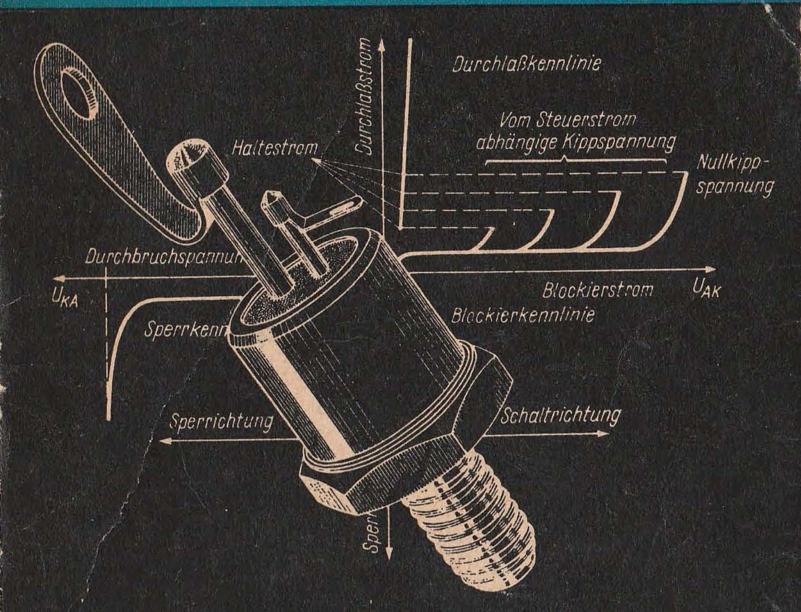
amateurreihe

electronica



Günter Pilz

Thyristoren — Eigenschaften und Anwendung

electronica · Band 110
Thyristoren — Eigenschaften
und Anwendung

GÜNTER PILZ

Thyristoren – Eigenschaften und Anwendung

MILITÄRVERLAG
DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN
REPUBLIK

1.—15. Tausend
Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik · Berlin 1972
Cheflektorat Militärliteratur
Lizenz-Nr. 5
ES-Nr.: 23 K
Lektor: Dipl.-Ing. Jürgen Hauke
Zeichnungen: Erich Böhm
Typografie: Helmut Herrmann · Hersteller: Dieter Kahnert
Vorauskorrektor: Elfriede Sell · Korrektor: Hans-Joachim Peters
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: I/16/01 Druckerei Märkische Volksstimme
15 Potsdam — A 688
Redaktionsschluß: 24. April 1972
Bestellnummer: 745 441 3
1,90

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Wohl kaum ein neues Bauelement der Elektrotechnik hat sich in den letzten Jahren so rasch und vor allen Dingen mit Erfolg durchgesetzt wie gerade der Thyristor. Er ist ein steuerbarer Gleichrichter, der eine ungeahnte Vielfalt von Anwendungsmöglichkeiten auf den Gebieten der elektronischen Regelungs- und Steuerungstechnik eröffnet. Auf Grund seiner guten regelungstechnischen Eigenschaften, des hohen Wirkungsgrades und der Zuverlässigkeit wird der Thyristor zur Drehzahlregelung von Motoren, zur Steuerung von Beleuchtungsanlagen, für Stromversorgungsgeräte mit geregelter Gleichspannung, zur Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom, als Umrichter u. a. m. verwendet. Mit dem Thyristor sind viele neue Begriffe entstanden. Auch sind seine Eigenschaften oft nicht so einfach überschaubar wie die anderer Halbleiterbauelemente. Es ist deshalb unbedingt erforderlich, daß man sich eingehend mit den Eigenschaften und den Anwendungsmöglichkeiten dieses Halbleiterbauelementes vertraut macht, bevor man mit Thyristoren arbeitet. Nur so wird es möglich sein, eventuelle Fehlschläge von vornherein auf ein Minimum zu beschränken oder, noch besser, sie ganz zu vermeiden. In Zukunft wird sich auch der Amateur bei neuen Bauelementen wahrscheinlich intensiver mit den theoretischen Grundlagen befassen müssen, als dies bisher der Fall gewesen ist. Aus den genannten Gründen ist in dieser Broschüre den allgemeinen Betrachtungen und theoretischen Erörterungen mehr Platz eingeräumt worden als sonst bei Heften dieser Reihe. Der Leser soll hier in einfacher Form mit den Eigenschaften, dem Aufbau, der Arbeitsweise und den bereits erwähnten vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten des Thyristors vertraut gemacht werden. Am Schluß findet der interessierte Leser noch einige kleine Schaltungsbeispiele zum Nachbau. Grundsätzliche Begriffe aus der Halbleitertechnik werden vorausgesetzt. Sollte der Leser für seine Hobbys, für das Studium oder viel-

leicht gar für seine tägliche Arbeit einige Anregungen bekommen haben, dann hat diese Broschüre ihren Zweck erfüllt.

Stralsund, Dezember 1971 *Günter Pilz*

1. Allgemeines

Die neuen Erkenntnisse in der Halbleitertechnik haben zur Entwicklung von steuerbaren Gleichrichtern, den Thyristoren, geführt. Da sie wesentlich neue, sehr bemerkenswerte Eigenschaften haben, sind sie für die moderne Antriebstechnik von größter Bedeutung. Die auffälligsten Merkmale, wie kleine Masse, geringer Raumbedarf, hoher Wirkungsgrad, keine beweglichen Teile, Geräuscharmut sowie ein relativ einfacher Schaltungsaufbau, haben dazu beigetragen, daß sich der Thyristor sehr rasch in vielen Bereichen der Elektrotechnik durchgesetzt hat. Auch bei Haushaltsgeräten und Kleinwerkzeugen wird der Thyristor bereits erfolgreich verwendet.
Beim Thyristor handelt es sich im Gegensatz zum normalen Siliziumgleichrichter um einen steuerbaren Siliziumgleichrichter, der die Eigenschaft hat, in beiden Richtungen den Stromfluß zu sperren. Der Thyristor ähnelt in seiner Arbeitsweise dem uns seit langem bekannten Thyratron. Jedoch hat der Thyristor gegenüber dem Thyratron einige Vorteile. Er benötigt keine Heizspannung, d. h., er ist sofort betriebsbereit. Die erforderliche Steuerleistung ist für vergleichbare Durchlaßströme wesentlich kleiner als beim Thyratron. Ebenfalls kleiner ist beim Thyristor der Spannungsabfall in Durchlaßrichtung und damit auch die Verlustleistung. Wegen seines schnellen Schaltverhaltens (die Freiwerdezeit des Thyristors ist wesentlich kürzer als die Entionisierungszeit des Thyratrons) eignet sich der Thyristor besonders zur Lösung von Aufgaben in der Steuer- und Regelungstechnik, wo schnell, kontaktlos und verlustarm geschaltet werden soll. Es können große Leistungen bei hohen Arbeitsspannungen geschaltet werden. Zur Zeit stehen Thyristoren zur Verfügung, die für Durchlaßströme (arithmetische Mittelwerte!) von weniger als 1 A bis über 200 A geeignet sind. Die Sperrspannungen haben Werte zwischen 50 und 1200 V (Spitzenwert!). Durch Parallelschaltung mehrerer Thyristoren läßt sich prinzipiell der Strombereich und

durch Reihenschaltung der Spannungsbereich erweitern. Durch Thyristoren ist es möglich, die bisher verwendeten Maschinenumformer größtenteils zu ersetzen. So werden z. B. Leistungsthyristoren für die Drehzahlregelung von Gleichstromantrieben bei Werkzeug- und bei Papiermaschinen verwendet. Weitere Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich bei Walzwerksantrieben, bei Triebfahrzeugen zur direkten Speisung und Steuerung der Fahrmotoren, bei Beleuchtungsanlagen, in der Kraftfahrzeugelektrotechnik, und sie dienen als Ein- und Ausschalter (kontaktloses Wechselstromschütz). Thyristoren mit kurzen Freiwerdezeiten werden auch als schnelle Thyristoren bezeichnet. Sie sind besonders für sehr hohe Schalthäufigkeiten geeignet und werden deshalb auch bei Wechselrichtern, Umrichtern und Gleichstromstellern verwendet. Der Thyristor übernimmt überall da, wo eine geregelte Gleichspannung gefordert wird, die Aufgabe des Stellglieds.

2. Aufbau des Thyristors

Der Grundaufbau des Thyristors besteht aus 4 Halbleiterschichten. Davon sind 2 p-leitend und 2 n-leitend. Die Schichten sind so angeordnet, daß sich eine pnpn-Struktur ergibt (Bild 2.1). Die Mittelzone enthält wenige Ladungsträger (schwachdotiert) und ist damit hochohmig. In den beiden äußeren Zonen dagegen befinden sich sehr viele Ladungsträger (hochdotiert). Bei der Herstellung der verschiedenen Schichten werden sowohl Legierungsverfahren als auch Diffusionsverfahren angewendet. Als Ausgangsmaterial benutzt man eine n-leitende Siliziumscheibe. Durch ein Diffusionsverfahren werden in diese Scheibe Fremdatome der 3. Gruppe des Periodensystems der Elemente eindiffundiert. So entstehen auf beiden Seiten der Siliziumscheibe p-leitende Zonen. Der Thyristor hat 3 Anschlüsse — die Katode, die Anode und die Zündelektrode. Diese Anschlüsse werden im Legierungsverfahren hergestellt. Um eine gute Wärmeableitung in den Kühlkörper zu gewährleisten, wird die Kristallscheibe mit der Anodenseite auf eine dicke Kupferplatte aufgebracht. Diese Platte aus Kupfer, auch Basisplatte genannt, die geschliffen und versilbert ist und so einen guten Wärmeübergang zum Kühlkörper gewährleistet, bildet gleichzeitig den Zellenboden des Thyristors. Um nun einen Thyristor zu erhalten, der während seiner langen Lebensdauer (vorausgesetzt, man hält alle Grenzdaten ein) seine Kenndaten nicht verändert, wird die ganze Anordnung in ein luftdichtes Gehäuse eingebaut, das mit einem Schutzgas gefüllt ist. Die Anschlüsse für die Steuerelektrode und für die Katode sind in Glasdurchführungen eingeschmolzen. Die Art der Kontaktierung ist bei kleineren und größeren Thyristortypen unterschiedlich. Bei kleineren Bauformen ist das Vierschichtelement mit seiner Trägerscheibe zwischen dem Kupferboden und den oberen Kontakten *hart* eingelötet. In Bild 2.2a ist ein solcher Thyristor schematisch dargestellt. Bei größeren Bauformen dagegen erweist sich ein

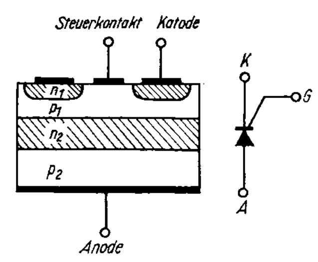


Bild 2.1 Prinzipieller Aufbau und Schaltzeichen des Thyristors

gelöteter Flächenkontakt als nachteilig. Dieser Nachteil resultiert daraus, daß bei einer festen Verbindung zweier Metalle mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei wechselnder Temperatur mechanische Spannungen in den verbindenden Lötstellen entstehen. Je größer dabei die Kontaktflächen sind, desto gefährlicher sind die mechanischen

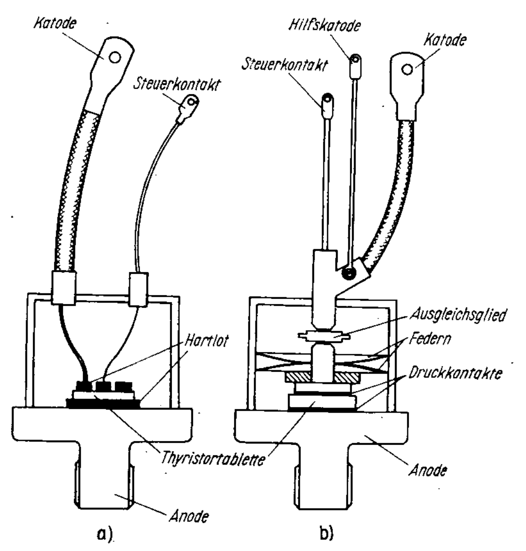


Bild 2.2 Schematische Schnittdarstellung von Thyristoren; a — hartgelöteter Thyristor, b — druckkontaktierter Thyristor

Spannungen. Man bevorzugt deshalb für größere Thyristortypen die Druckkontakttechnik. Hierbei wird die Thyristortablette unter hohem Druck (etwa 50 kp/cm^2) durch ein Federpaket aus Stahlfedern zwischen die beiden Anschlußelektroden gepreßt. Dieser Thyristortyp ist in Bild 2.2b dargestellt. Die Kapsel ist mit einem *inerten* Gas gefüllt, das die Haltbarkeit und die Zuverlässigkeit des Druckkontakts erhöht.

3. Arbeitsweise des Thyristors

Zur Erklärung der Arbeitsweise eines Thyristors kann man sich diesen als eine Kombination von einem pnp- und einem npn-Transistor denken, die so zusammengeschaltet sind, daß sie jeweils Basis und Kollektor gemeinsam haben. Natürlich kann man in der Praxis nicht mit einem pnp- und einem npn-Transistor einen Thyristor ersetzen (Bild 3.1).

Ausgehend von Bild 3.1, wollen wir den Stromverstärkungsfaktor des pnp-Transistors v_{i1}, den des npn-Transistors v_{i2} nennen. Bei niedriger positiver Spannung zwischen Anode und Katode und offener Steuerstrecke fließt ein sehr kleiner Strom durch den Thyristor. Dieser Strom setzt sich aus folgenden 3 Komponenten zusammen:

— Reststrom I_0 über die gemeinsame Sperrschicht S_{Sp};
— Kollektorstrom des pnp-Transistors $I \cdot v_{i1}$;
— Kollektorstrom des npn-Transistors $I \cdot v_{i2}$.

Als Gleichung dargestellt, ergibt sich folgender Ausdruck für den Strom:

$$I = I_0 + I \cdot v_{i1} + I \cdot v_{i2}$$

$$I_0 = I - I \cdot (v_{i1} + v_{i2})$$

$$I_0 = I \cdot (1 - v_{i1} - v_{i2})$$

$$I = \frac{I_0}{1 - (v_{i1} + v_{i2})}$$

(Die Stromverstärkungsfaktoren v_{i1} und v_{i2} sind bei sehr kleinen Strömen $< 0{,}5$.)

3.1. Zünden des Thyristors

Wie eingangs erwähnt, ist der Thyristor ein steuerbarer Siliziumgleichrichter, der den Stromfluß in beiden Richtungen sperren kann. Um den Durchlaßzustand zu erreichen, d. h., den Thyristor zu zünden, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die wir uns in den folgenden Ausführungen etwas näher ansehen wollen.

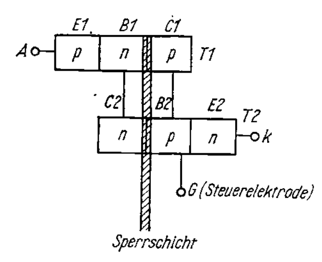


Bild 3.1 Ersatzschaltung eines Thyristors

3.1.1. Zünden durch einen Zündstrom über die Steuerelektrode

Die in der Praxis allgemein gebräuchlichste Art des Zündens ist die durch einen Zündstrom, den man über die Steuerelektrode gegen die Katode fließen läßt. An Hand von Bild 3.2 wollen wir uns diesen Vorgang etwas näher betrachten.
Bei Sperrung in positiver Richtung (s. a. Blockierungskennlinie, Bild 4.3) liegt die ganze Spannung am mittleren pn-Übergang. Dabei hat der Kollektor C1 gegenüber dem Emitter E1 eine negative Vorspannung und der Kollektor C2 gegenüber dem Emitter E2 eine positive Vorspannung. Soll nun der Thyristor in den leitenden Zustand gebracht werden, so ist ein

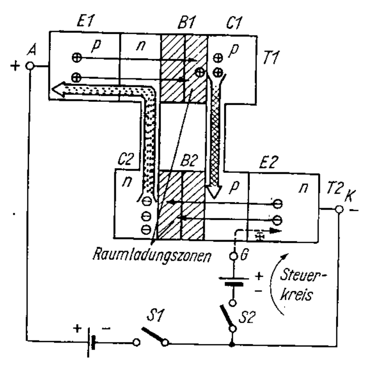


Bild 3.2 Zündvorgang durch Zündstrom

kurzer Stromimpuls nötig, der über die p-leitende Basis B2 eingespeist wird. Die von der Basis B2 in den Emitter E2 gelangenden Defektelektronen heben das Basispotential an und lösen einen wesentlich höheren Elektronenstrom aus, der fast unvermindert durch den Kollektor C2 (positiv!) aufgefangen wird. Dieser Kollektorstrom steuert nun über die Basis B1 den „Transistor T1" an. Dadurch wird eine weitere verstärkte Injektion von Defektelektronen des Emitters E1 bewirkt. Es gelangen positive Ladungsträger über den Kollektor C1 zur Basis B2. Dieser Vorgang setzt sich mit steigender Wirkung fort. Der Strom schaukelt sich lawinenartig auf, und der pn-Übergang wird mit Ladungsträgern überschwemmt. Die Mittelzone füllt sich so lange, bis ein Arbeitspunkt auf der Durchlaßkennlinie erreicht ist. Das ist bei Betrachtung der vorher genannten Gleichung der Fall, wenn die Summe von v_{i1} und v_{i2} $= 1$ ist; der Thyristor zündet.

3.1.2. Zünden durch Erhöhung der angelegten Spannung bei offener Steuerelektrode

Erhöht man bei offener Steuerelektrode die angelegte Spannung, so steigt der Strom im mittleren Spannungsbereich nicht bzw. nur ganz gering an. Erst im höheren Spannungsbereich geht dann mit einsetzendem Lawinenstrom die Stromkurve in einen steil ansteigenden Ast über (vgl. statische Kennlinie). Bei einer ganz bestimmten Stromhöhe zündet der Thyristor. Die Spannung, bei der der Thyristor in den leitenden Zustand übergeht, wird als Nullkippspannung bezeichnet. Die Nullkippspannung ist also der Wert der Blockierspannung, bei der der Thyristor bei offenem Steuerkreis in den leitenden Zustand kippt. Die Höhe der Nullkippspannung ist stark von der Temperatur abhängig. Mit steigender Temperatur sinkt die Nullkippspannung. Das bedeutet, daß bei Überschreiten der zulässigen Temperaturgrenze die Blockierfähigkeit des Thyristors stark abnimmt. Ein Zünden durch Überschreiten der Nullkippspannung sollte stets vermieden werden, weil sonst durch hohe örtliche Feldstärken an der Elementeoberfläche, Überschläge entstehen können, die den Thyristor zerstören.

3.1.3. Zünden durch eine hohe Spannungsanstiegsgeschwindigkeit

Eine 3. Möglichkeit, den Thyristor zu zünden, ergibt sich, wenn die in Schaltrichtung angelegte Spannung einen sehr steilen Anstieg du/dt hat. Bekanntlich hat jede Sperrschicht von Halbleiterbauelementen einen bestimmten Kapazitätswert. Dieser ist von der Breite der Sperrschicht (Kapazitätsdioden!) abhängig. Der über die Sperrschichtkapazität fließende Ladestrom ist der Anstiegsgeschwindigkeit der Spannung nach folgender Gleichung proportional:

$$I = C \cdot du/dt.$$

Wenn der Strom groß genug ist, hat er die gleiche Eigenschaft wie der über die Steuerelektrode fließende Zündstrom. Wie allgemein bekannt sein dürfte, sind Kapazitäten flächenproportional. Für die Thyristoren bedeutet dies, daß bei größeren Bauformen die du/dt-Abhängigkeit eine größere Rolle spielt als bei kleineren Thyristoren. Die Spannungsanstiegsgeschwindigkeit du/dt ist ebenfalls temperaturabhängig. Das äußert sich so, daß mit steigender Temperatur der Thyristor empfindlicher gegen große du/dt-Werte (steile positive Spannungsanstiege!) wird.
Die kritische Spannungsanstiegsgeschwindigkeit eines Thyristors ist im wesentlichen von folgenden 3 Faktoren abhängig: von der Sperrschichttemperatur, vom Spitzenwert der positiven Sperrspannung und vom Steuerstrom.
Ein Zünden des Thyristors ohne Zündimpuls wird bei einem Spannungsanstieg du/dt $\leqq 20$ V/μs vermieden. Wenn man eine in Sperrichtung liegende Vorspannung an die Steuerstrecke legt, läßt sich der kritische du/dt-Wert, wenngleich nur in geringen Grenzen, nach größeren Werten hin verschieben. Allerdings muß man hierbei besonders darauf achten, daß man nicht den für den jeweiligen Thyristortyp zulässigen Steuerkreissperrstrom überschreitet. Steile Spannungsanstiege in entgegengesetzter, also negativer Richtung beeinflussen den Thyristor nicht, wenn die Spannungsscheitelwerte die zulässigen statischen Sperrwerte nicht überschreiten.

3.1.4. Zündstrombedarf und Zündkennlinie

Vergleichen wir den Durchlaßstrom und den Zündstrom eines Thyristors, so können wir feststellen, daß der für das Zünden des Thyristors benötigte Zündstrom sehr viel kleiner als der Durchlaßstrom ist. Der Zündstrom ist (wie fast alle technischen Daten von Halbleiterbauelementen) stark von der Temperatur abhängig. Wir sprechen von einem statischen Zündwert. Man versteht darunter denjenigen Steuerstrom bzw. diejenige Steuerspannung, bei der der Thyristor gerade zündet. Die in Bild 3.3 dargestellte Zündkennlinie charakterisiert die Abhängigkeit von Steuerspannung und Steuerstrom. Aus der Charakteristik eines ČKD-Thyristors vom Tpy T 16 ist ersichtlich, daß z. B. bei einer Sperrschichttemperatur von +25 °C im ungünstigsten Fall ein Zündstrom von etwa 85 mA und eine Spannung von 3 V benötigt werden. Die unterste Zündgrenze liegt bei etwa 0,2 bis 0,3 V. Bei allen darunter liegenden Werten der Spannung ist auch unter extremsten Bedingungen keine Zündung möglich. Bei einer genaueren Untersuchung der Abhängigkeit des Durchlaßstroms von der Durchlaßspannung kann man feststellen, daß es einen Bereich möglicher Zündung und einen Bereich der sicheren Zündung gibt.
Der Zündstrom selbst hat einen ziemlich großen Streubereich. Die statischen Zündwerte sind außer von der Temperatur auch von der zwischen Anode und Katode anliegenden Spannung abhängig, allerdings nur bei Spannungen < 5 V. Besonders beim Parallelbetrieb von Thyristoren ist der Einfluß der Anoden-Katoden-Spannung zu beachten. Es kann dabei vorkommen, daß der zuerst gezündete Thyristor seine Durchlaßspannung den parallelgeschalteten Thyristoren als Anoden-Katoden-Spannung aufzwingt und daß infolge eines zu hohen statischen Zündstroms die Thyristoren nicht mehr zünden. Wird anderenfalls der erforderliche Zündstrom nicht ganz erreicht, so wird auch die Einschaltbedingung nicht erfüllt, d. h., der Thyristor zündet nicht. Liegt der Wert des Zündstroms nur wenig über dem geforderten Wert, so läuft der Zündvorgang verlangsamt ab. Es kann dabei zu relativ großen Einschaltver-

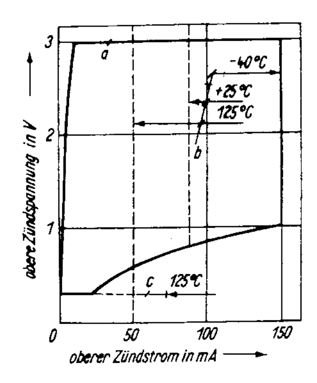


Bild 3.3 Temperaturabhängige Zündcharakteristik; a — obere Zündspannung im gesamten Betriebstemperaturbereich, b — oberer Zündstrom bei den genannten Sperrschichttemperaturen, c — untere Zündspannung bei den angegebenen Sperrschichttemperaturen

zögerungen kommen. Diese Verzögerungen können bis zu einigen hundert Mikrosekunden groß sein. Wir sehen also, wie wichtig die richtige Dimensionierung des Zündstroms ist. Deshalb muß der Steuerstrom stets etwas höher liegen als der statisch vorgesehene Wert. Nur so wird eine einwandfreie Zündung erreicht. Für kurze Einschaltzeiten ist es unbedingt erforderlich, daß der Zündstrom entsprechend hoch ist und gleichzeitig steil ansteigt.

3.1.5. Zündimpulsbreite

Ein Zündimpuls muß so breit sein, d. h., seine zeitliche Dauer muß so lang sein, daß der Thyristor mit Sicherheit gezündet wird. Dieser Fall tritt dann ein, wenn der Haltestrom (kleinster Wert des im Lastkreis fließenden Stromes, bei dem der Thyristor gerade noch leitend ist) überschritten wird. Im wesentlichen hängt die Zündimpulsbreite von den Eigenschaften des Lastkreises ab. Bei rein Ohmscher Last und steil ansteigendem Laststrom genügt ein Zündimpuls geringerer Breite (etwa 10 μs). Dafür reicht meist schon eine Impulsbreite von

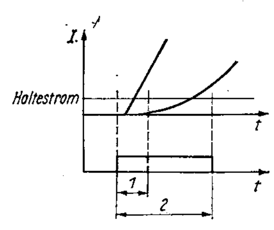


Bild 3.4 Zündimpulsbreite bei verschiedenen Laststromanstiegen; 1 — Zündimpulsbreite bei Ohmscher Belastung, 2 — Zündimpulsbreite bei induktiver Belastung

etwas mehr als der Einschaltzeit aus. Überwiegt im Lastkreis die induktive Belastung, so muß die Dauer des Zündimpulses wesentlich größer sein als die Einschaltzeit, da hierbei durch die Induktivität eine Verzögerung des Laststromanstiegs auftritt (Bild 3.4).
Bild 3.4 zeigt uns prinzipiell die erforderliche Zündimpulsbreite bei verschiedenen Laststromanstiegen. Man wird im Normalfall darauf achten, daß die Zündimpulsbreite nicht zu groß wird, um die damit verbundene Steuerverlustleistung klein zu halten. Sind im Lastkreis große Induktivitäten vorhanden, so erreicht man durch Parallelschaltung eines R-C-Gliedes zum Lastkreis, daß mit einem relativ schmalen Steuerimpuls der Haltestrom sicher überschritten wird.

3.2. Löschen des Thyristors

Ist ein Thyristor einmal durch einen Steuerimpuls gezündet worden, d. h., führt der Thyristor in Durchlaßrichtung Strom, dann kann er durch die Steuerelektrode nicht mehr beeinflußt werden. Eine gewisse Einschränkung gilt diesbezüglich für einige Thyristortypen mit sehr geringen Durchlaßströmen. Soll nun der Thyristor den Stromfluß wieder sperren, so muß man entweder den Stromkreis unterbrechen oder den Lastwiderstand so weit erhöhen, daß der Haltestrom unterschritten wird. Der Haltestrom ist ebenfalls sehr von der Sperrschichttemperatur des Thyristors abhängig. Mit größer werdender Sperrschichttemperatur sinkt der Wert des Haltestroms. Wird

die zulässige Sperrschichttemperatur überschritten, so verliert schließlich der Thyristor seine Sperrfähigkeit. Es ist also gerade beim Thyristor besonders wichtig, immer wieder auf die exakte Einhaltung aller thermischen Grenzwerte zu achten. Nur so wird es möglich sein, ein einwandfreies Funktionieren aller Schaltungen zu gewährleisten.

4. Eigenschaften des Thyristors

4.1. Arbeitskennlinie des Thyristors

Um das Verhalten des Thyristors besser verstehen zu können, wollen wir uns zunächst die in Bild 4.1 dargestellte charakteristische Arbeitskennlinie eines Thyristors etwas näher betrachten. Im I. Quadranten wird der Thyristor durch 2 Kennlinien charakterisiert, durch die Durchlaß- und die Blockierungskennlinie. Der leitende Zustand des Thyristors wird dabei durch die Durchlaßkennlinie und der nichtleitende durch die Blockierungskennlinie dargestellt. Der im III. Quadranten befindliche Teil der Kennlinie wird als Sperrkennlinie bezeichnet. Wie der Name sagt, kennzeichnet dieser Teil der Kennlinie das Verhalten des Thyristors in Sperrichtung. Bei anliegender Anoden-Katoden-Spannung sperrt der Thyristor, bis auf einen ganz geringen Reststrom, in beiden Richtungen. Auch bei höheren Spannungen fließen dabei noch sehr kleine Ströme. Meist sind die Thyristoren so konstruiert, daß die zulässigen Blockier- und Sperrspannungen ungefähr gleiche Werte haben. Betrachtet man die Sperrkennlinie, so kann man 2 Bereiche feststellen. Wird die Sperrspannung erhöht, so stellt man in den mittleren Spannungsbereichen kaum eine Erhöhung des Sperrstroms fest. Der Sperrstrom zeigt einen gewissen Sättigungscharakter, und man spricht dabei von einem Sperrstromniveau. Bei weiterer Erhöhung der Spannung kommen wir schließlich zu dem Punkt auf der Kennlinie, bei dem der Sperrstrom lawinenartig ansteigt. Die Spannung, bei der dieser Vorgang einsetzt, wird als Durchbruchspannung bezeichnet. Durch den steilen Sperrstrom wird einmal die Sperrfähigkeit des Thyristors begrenzt, und weiterhin wird die Verlustleistung in Sperrichtung (Sperrverluste) erhöht, was eine Zerstörung des Thyristors zur Folge haben kann.
Die Blockierungskennlinie unterscheidet sich, wie bereits oben angedeutet, kaum von der Sperrkennlinie. Auch hier

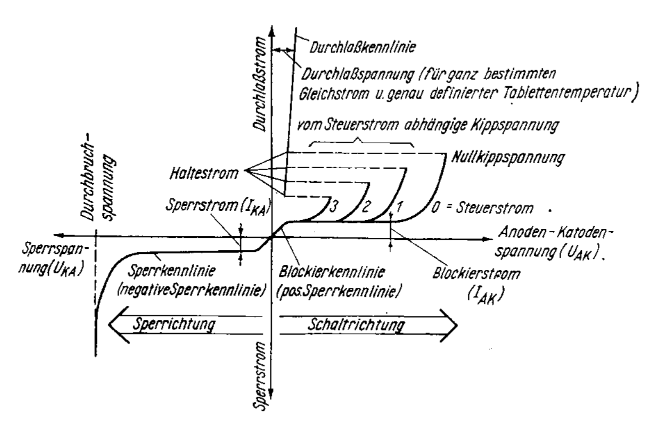


Bild 4.1 Arbeitskennlinie

steigt der Strom im mittleren Spannungsbereich fast überhaupt nicht an. Wird beim „Durchfahren“ der Blockierungskennlinie eine bestimmte Stromhöhe erreicht, so geht der Thyristor in den leitenden Zustand über. Die Spannung, bei der der Thyristor bei offener Steuerstrecke (Steuerstrom = 0!) zündet, d. h. in den leitenden Zustand übergeht, wird als Nullkippspannung bezeichnet. Bei geschlossenem Steuerkreis und bei Fließen eines Zündstroms über die Steuerstrecke können wir feststellen, daß mit wachsendem Steuerstrom die Kippspannung kleiner wird.
Für den Thyristor gibt es demnach wahlweise 3 verschiedene Zustandsbereiche, denen ganz entsprechend 3 Kennlinienzweige zuzuordnen sind (Bild 4.1).

4.2. Einschaltzeit

Das Einschaltverhalten eines Thyristors wird durch seine Einschaltzeit charakterisiert. Was versteht man nun unter der Einschaltzeit? Die Einschaltzeit t_E setzt sich aus 2 Komponenten, der Einschaltverzugszeit t_V und der Stromanstiegszeit t_A zusammen.

$$t_E = t_V + t_A$$

Die Einschaltverzugszeit t_V ist die Zeit, die zwischen dem Beginn eines sehr steilen Zündimpulses und dem Anstieg des Durchgangsstromes auf 10 % seines Endwertes vergeht. Unter der Stromanstiegszeit t_A verstehen wir die Zeit, in der der Durchgangsstrom von 10 % bis auf 90 % seines Endwertes ansteigt. Während sich die Einschaltverzugszeit durch die Steilheit und Höhe der Zündimpulse beeinflussen läßt, kann die Stromanstiegszeit nicht über die Steuerelektrode beeinflußt werden. Bild 4.2 verdeutlicht noch einmal das eben Gesagte.

4.3. Stromanstiegsgeschwindigkeit

Die Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt ist für den Thyristor ein sehr wichtiger und stets zu beachtender Wert. Nach dem Zünden des Thyristors fällt die in Schaltrichtung anliegende Spannung nach einer Zeitfunktion auf die Durchlaßspannung ab. Ist nun der Stromanstieg, besonders bei hohen Frequenzen, sehr steil, so können für kurze Zeit erhebliche Schaltverlustleistungen auftreten. Überschreitet der für den Thyristor festgelegte di/dt-Wert sein zulässiges Höchstmaß, so muß die Stromanstiegsgeschwindigkeit durch entsprechende Schaltmittel, z. B. durch Drosseln, herabgesetzt werden. Daß für die Stromanstiegsgeschwindigkeit ein ganz bestimmter Grenzwert festgelegt ist, der auf gar keinen Fall überschritten werden

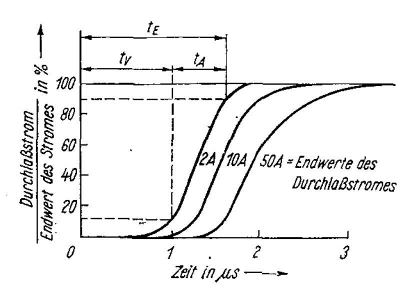


Bild 4.2 Einschaltvorgang

darf, liegt daran, daß beim Zünden des Thyristors nur eine sehr kleine, in unmittelbarer Nähe des Zündkontakts liegende Fläche des Kristalls leitend wird. Die gesamte Fläche des Kristalls wird nicht sofort, sondern erst nach einer endlichen Zeit leitend. Diese Zeitspanne ist abhängig von der Größe und von dem inneren Aufbau des Kristalls. Eine sehr große Stromanstiegsgeschwindigkeit hätte damit erhebliche Stromdichten zur Folge, die zur thermischen Überlastung der Kristalltablette und somit zur Zerstörung des Thyristors führen. Im Mittel liegt der höchstzulässige Wert für di/dt bei 20 A/μs. Bei kleineren Stromscheitelwerten (etwa 30 bis 40 A) können größere Stromanstiegsgeschwindigkeiten zugelassen werden, da der zunächst kleine zur Verfügung stehende leitende Teil der Thyristortablette geringe Ströme ohne Zerstörung führen kann.

4.4. Ausschaltvorgang

Normalerweise läßt sich ein gezündeter Thyristor nicht mehr durch die Steuerelektrode beeinflussen. Lediglich bei Exemplaren mit sehr geringen Durchlaßströmen ist dies möglich. Bei den in der Leistungselektronik verwendeten Thyristoren muß der Stromfluß unterbrochen bzw. kurzzeitig unter den Haltestrom gesetzt werden. Nach einer Stromunterbrechung erlangt der Thyristor nicht sofort seine volle Sperrfähigkeit. Es vergeht eine gewisse Zeit, ungefähr 10 bis 100 μs, bis die überschüssigen Ladungsträger durch Rekombination verschwunden sind. Mit einer negativen Sperrspannung kann man einen Teil der gespeicherten Ladungsträger absaugen und dadurch den eben geschilderten Vorgang beschleunigen. In Bild 4.3 ist der Ausschaltvorgang dargestellt. Beim Ausschaltvorgang des Thyristors unterscheidet man 2 Phasen.
In der 1. Phase erlangt der Thyristor nach einer ganz bestimmten Sperrverzögerungszeit t_V wieder seine negative Sperrfähigkeit. In der 2. Phase schließlich wird nach der Freiwerdezeit t_f die Blockierfähigkeit des Thyristors hergestellt. In Bild 4.3 können wir sehen, daß der Strom ziemlich steil zurückgeht. Bei seinem Nulldurchgang ist aber die Zelle noch nicht gleich

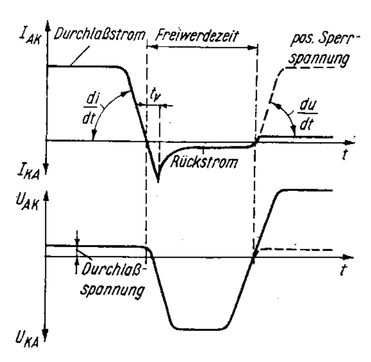


Bild 4.3 Ausschaltvorgang

gesperrt, da ja an der Sperrschicht noch Ladungsträger vorhanden sind. Der Rückstrom steigt dann ganz kurz in Sperrrichtung an und klingt langsam auf den statischen Sperrstrom ab. Man bezeichnet diesen Vorgang auch als Träger-Speicher-Effekt (TSE). Erst wenn alle Ladungsträger aus dem p-n-Übergang „abgesaugt" sind, sperrt der Thyristor.
Unter der Sperrverzögerungszeit versteht man die Zeit, die zwischen Stromnulldurchgang und Sperrspannungsübernahme vergeht. Der Rückstrom hat in diesem Augenblick sein Maximum erreicht. Er fällt dann, im Anfang zunächst sehr steil, auf den statischen Sperrstrom ab. Durch die große Änderungsgeschwindigkeit des Rückstroms während der Übernahme der Sperrspannung entstehen in den Induktivitäten des Kommutierungskreises Überspannungen am Thyristor, die zur Zerstörung des Halbleiterbauelements führen können. Eine Begrenzung dieser Überspannungen kann durch eine RC-Beschaltung erreicht werden.
Bei einer Reihenschaltung von Thyristoren ist zu beachten, daß sich der statische Sperrstrom erst nach einer endlichen Zeit von etwa 20 bis 50 μs einstellt.

4.5. Freiwerdezeit

Unter der Freiwerdezeit eines Thyristors verstehen wir die Zeit, die nach dem Nulldurchgang des Stromes vergeht, bis der Thyristor wieder seine volle Sperrfähigkeit in Schaltrichtung erreicht hat. Für die Praxis bedeutet das eine bestimmte Mindestwartezeit, die vergehen muß, bis der Thyristor nach dem Stromnulldurchgang wieder seine Blockierfähigkeit erlangt hat. Nach der Freiwerdezeit, die im wesentlichen von der Konstruktion des Thyristors bestimmt wird, richtet sich die Arbeitsfrequenz, mit der der Thyristor betrieben werden kann. Im Mittel liegt die Freiwerdezeit bei 10 bis 100 μs. Auch die Freiwerdezeit ist stark abhängig von der Sperrschichttemperatur. Mit steigender Temperatur vergrößert sich auch die Freiwerdezeit. Außer von der Sperrschichttemperatur ist die Freiwerdezeit weiterhin abhängig von

— dem Durchgangsstrom vor dem Abschalten;
— der Höhe des Stromes in Sperrichtung;
— der Höhe der Sperrspannung;
— der Höhe der Spannung in Schaltrichtung;
— der Anstiegsgeschwindigkeit des Stromes in Sperrichtung;
— der Anstiegsgeschwindigkeit der Spannung in Schaltrichtung.

4.6. Thermische Eigenschaften

Wie bereits mehrmals erwähnt, sind beim Thyristor fast alle Kenndaten stark von der Temperatur abhängig. Besonders weil der Thyristor von einer bestimmten Sperrschichttemperatur an seine Sperrfähigkeit verliert, muß die in der Sperrschicht erzeugte Verlustleistungswärme schnell nach außen abgeführt werden. Beim Entwurf von Thyristorgeräten ist deshalb ganz besonders auf gute Kühlung und richtige Strombelastung zu achten. Bei den Thyristoren unterscheidet man eine obere und eine untere Temperaturgrenze. Die untere Temperaturgrenze liegt bei ungefähr —40 °C. Diese Temperaturgrenze hängt im wesentlichen von den Eigenschaften des verwendeten Materi-

als, der Kontaktierung und des Oberflächenschutzes der Thyristortablette bei tieferen Temperaturen ab. Die obere Temperaturgrenze dagegen wird durch die geforderte hohe Sperrstabilität und Lebensdauer und durch die große Abhängigkeit der Nullkippspannung von der Temperatur festgelegt. Die obere Grenztemperatur richtet sich aber auch nach dem Einsatz des Thyristors, je nachdem, ob der Thyristor als steuerbarer Gleichrichter, als Wechselrichter oder als Gleichstromsteller arbeitet. Wir wollen uns nun kurz dem Begriff des thermischen Innenwiderstandes zuwenden. Unter dem thermischen Innenwiderstand versteht man das Wärmeableitvermögen eines Thyristors von seiner Sperrschicht zum Gehäuseboden hin. Ausgedrückt wird der thermische Innenwiderstand durch die Differenz von Sperrschichttemperatur T_{sp} und Gehäusebodentemperatur T_G dividiert durch die Verlustleistung. Die Formel dafür lautet:

$$R_{thi} = \frac{T_{sp} - T_G}{P_v};$$

R_{thi} in °C/W.
Zum schnellen Abführen der Gehäusetemperatur T_G an die Umgebungstemperatur T_U wird für jeden Thyristortyp ein entsprechender Kühlkörper verwendet. Dabei soll die Kühlfläche bzw. der Kühlkörper einen kleinen thermischen Austauschwiderstand R_{tha} haben. Dieser thermische Austauschwiderstand kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$R_{tha} = \frac{T_K - T_U}{P_v};$$

R_{tha} in °C/W.
T_K ist dabei die Kühlkörpertemperatur. Die Oberfläche des Kühlkörpers sollte möglichst groß sein. Er muß so konstruiert sein, daß von der Befestigungsstelle des Thyristors bis zu den Rändern des Kühlkörpers keine Temperaturdifferenzen auftreten.

4.7. Strombelastbarkeit des Thyristors

Die exakte Vorausbestimmung der Strombelastbarkeit ist wichtig für die richtige und wirtschaftliche Anwendung von Thyristoren. Drei grundsätzliche Punkte sind bei der Festlegung der Strombelastbarkeit eines Thyristorgeräts zu beachten.

Da ist zunächst die Grenzbelastbarkeit eines Geräts. Sie wird festgelegt durch die Stärke der Kühlung, die Höhe der Umgebungstemperatur, durch den höchstzulässigen Dauerstrom der Thyristoren und außerdem bei sehr kleinen Frequenzen auch von der Frequenz.

Der zweite zu beachtende Punkt ist die Überlastbarkeit eines Thyristorgeräts. Um eine Schaltung bzw. ein Gerät vor Überbelastung zu schützen, darf man die Grenzbelastung im Dauerbetrieb nicht ausnutzen. Mit entsprechenden Überlastkennlinien läßt sich die zulässige Überlastbarkeit bestimmen.

Der letzte Punkt gilt dem Schutz des Geräts. Für einen richtigen Entwurf eines Thyristorgeräts ist der wirksame Schutz sehr wichtig. Nicht zuletzt werden Überlastbarkeit und Dauerbelastbarkeit durch die Ansprechcharakteristiken der Schutzeinrichtungen bestimmt.

Es sollen nun noch kurz einige wichtige Begriffe zur Strombelastbarkeit des Thyristors erläutert werden.

Durchlaßstrom, Nennstrom

Der höchstzulässige Strom durch den Thyristor ist im wesentlichen von der Intensität der Kühlung abhängig. Unter Nennstrom versteht man den arithmetischen Mittelwert des dauernd zulässigen Durchlaßstroms bei 1phasiger Einwegschaltung und Ohmscher Belastung (auf die volle Periode bezogen). Dabei gelten die Nennströme immer in Verbindung mit den dazugehörigen Kühlkörpern.

Periodischer Spitzenstrom

Darunter versteht man den Spitzenwert des Stromes innerhalb einer Periode (auch bei nicht sinusförmigem Stromverlauf). Bei nicht sinusförmigem Stromverlauf darf der arithmetische

Mittelwert des Stromes ebenfalls nicht den Nennstrom überschreiten.

Stoßstrom

Ein Maß für die Güte eines Thyristors in Schaltrichtung ist der Stoßstromgrenzwert. Man versteht darunter den höchstzulässigen Augenblickswert eines einzelnen Stromimpulses in Form einer Sinushalbwelle bei einer Frequenz von 50 Hz aus dem Nennbetrieb heraus. Nach einem solchen Stromimpuls muß eine Pause von mindestens 1 Minute eintreten. Der Stoßstrom darf nur in Schadensfällen, aber nie betriebsmäßig auftreten.

Dauergrenzstrom

Er ist der höchstzulässige Mittelwert des Gleichstroms bei bestimmter Stromform, entsprechender Frequenz und genau festgelegten Kühlbedingungen. Mit ihm wird die Grenzbelastbarkeit eines Thyristors im Dauerbetrieb angegeben.

Typenstrom

Er ist nicht mit dem Nennstrom zu verwechseln. Der Typenstrom gibt an, wie groß der Dauergrenzstrom unter praktischen Bedingungen werden darf (Normalbedingungen). Folgende Punkte müssen dabei beachtet werden:

— Verwendung eines entsprechenden Kühlkörpers bei gleichzeitiger Fremdbelüftung und ganz bestimmter Kühlluftmenge;
— Temperatur der Zuluft = 40 °C;
— Frequenz = 50/60 Hz;
— Stromform, die für die Verwendung des Thyristors typisch ist.

Der Typenstrom ist ein Maß für die Strombelastbarkeit unter typischen Betriebsverhältnissen.

Haltestrom

Der Haltestrom wurde bereits mehrmals kurz erwähnt. Man versteht unter dem Haltestrom denjenigen Strom, der unbedingt im Lastkreis fließen muß, damit der gezündete Thyristor

leitend bleibt. Der Haltestrom ist stark von der Temperatur abhängig und unterliegt einer relativ großen Exemplarstreuung. Besonders bei induktiven Lastkreisen ist darauf zu achten, daß der Zündimpuls lang genug ist. Bekanntlich ist ja der Anstieg des Laststroms bei induktiver Belastung während des Zündvorgangs verzögert.

5. Schutzmaßnahmen

Damit die mit Thyristoren bestückten Geräte stets einsatzbereit sind, müssen entsprechende Schutzmaßnahmen getroffen werden. Die Thyristoren müssen vor zu hohen Beanspruchungen durch Ströme und Spannungen geschützt werden. Zunächst wollen wir uns dem Überstromschutz zuwenden.

5.1. Überstromschutz

Bei der Anwendung von Thyristoren wird es vorkommen, daß kurzzeitig Laststromspitzen auftreten, die den zugelassenen Nennstrom des Thyristors überschreiten. An Hand von Überstromkennlinien, die in den Datenblättern enthalten sind, kann der Anwender feststellen, welche Überströme auftreten dürfen und für welche Zeit, ohne daß der Thyristor gefährdet wird. In Bild 5.1 ist die Stromüberbelastbarkeit in Abhängigkeit von der Überlastungsdauer bei verschiedenen Sperrschichttemperaturen dargestellt. Der Thyristor wird bei einem Kurzschluß am höchsten belastet. In einem solchen Kurzschlußfall muß der Thyristor durch sehr schnell ansprechende Sicherungen

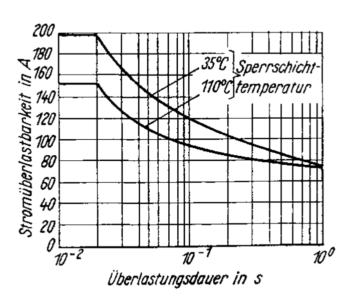


Bild 5.1 Strombelastbarkeit in Abhängigkeit von der Überlastungsdauer bei verschiedenen Sperrschichttemperaturen

abgeschaltet werden. Geschieht dies nicht schnell genug, so wird die zulässige Sperrschichttemperatur stark überschritten, der Thyristor verliert für kurze Zeit seine Sperrfähigkeit bzw. wird sogar zerstört. Der Verlust der Sperrfähigkeit ist, wie bereits früher erwähnt, auf die starke Abhängigkeit des Haltestroms von der Sperrschichttemperatur zurückzuführen. In der Praxis werden überflinke Sicherungen, strombegrenzende Einrichtungen und Schnellschalter verwendet. Im Langzeitgebiet muß der Thyristor gegen längere Zeit anstehende Überströme durch thermische Überstromauslöser geschützt werden. Sie werden mit der Kurzschlußsicherung in Reihe geschaltet. Diese Überstromauslöser werden dabei so eingestellt, daß bei etwa 1,2fachem Überstrom der Auslöser nach rund 20 Minuten anspricht. Die richtige Schutzeinrichtung wird gewählt durch den Vergleich der Thyristor-Überlastkurven mit den Abschaltcharakteristiken oder Auslösecharakteristiken der Schutzeinrichtungen. Außer den schon genannten thermischen Überstromauslöser werden auch Überstromrelais, Sicherungen und Konstantstromregelung angewendet. Oft wendet man in der Praxis nicht nur eine einzige Schutzeinrichtung an, sondern eine Kombination. So kann z. B. als Kurzschlußschutz für ein Stromrichtergerät folgende Kombination angewendet werden: Thyristoren (man spricht dabei auch von einem inneren Kurzschluß) werden durch Sicherungen, die übrigen Anlagenteile durch Schnellschalter abgeschaltet.

5.2. Überspannungsschutz

Neben dem Überstromschutz ist auch ein Schutz vor Überspannungsspitzen erforderlich. Durch eine Schutzbeschaltung wird der Thyristor vor schädlichen Spannungsspitzen bewahrt. Für die Schutzbeschaltung müssen besonders die Höhe der Überspannungen, die Anstiegsgeschwindigkeit der Spannung du/dt und die Spannungsbeanspruchung berücksichtigt werden. Wie sieht nun eine solche Schutzbeschaltung aus ? Im einfachsten Fall wird der Thyristor durch einen parallelgeschalteten Kondensator gegen die auftretenden Spannungsspitzen geschützt.

Für die Bemessung dieses Schutzkondensators wird angenommen, daß die gesamte zum Zeitpunkt des Sperrstromspitzenwerts in den Induktivitäten des Stromkreises gespeicherte Energie auf den Kondensator übertragen wird. Weiterhin soll die Kondensatorspannung höchstens um die Differenz zwischen der zulässigen Spitzensperrspannung des Thyristors und der Betriebsspannung ansteigen. Aus diesen Bedingungen ergibt sich die Größe des Kondensators. Nach [1] ist dieser wie folgt zu dimensionieren:

$$C_{min} = \frac{L\,\hat{i}_{KA}^2}{(U_{Spitze} - U_{Netz})^2};$$

$\hat{i}_{KA}$ = Sperrstromspitzenwert, L = Induktivität des Verbrauchers: C_{min} in F.

Um die durch Entladungen des Kondensators beim Einschalten des Thyristors entstehenden Einschaltverluste niedrig zu halten, schaltet man in Reihe mit dem Schutzkondensator einen Widerstand zur Begrenzung des Einschaltstroms auf den höchstzulässigen Wert. Ebenfalls nach [1] kann dieser Widerstand nach folgender Formel festgelegt werden:

$$R_{min} = \frac{U_{Netz}}{I_{E_{zul}} - I_{E_{Last}}};$$

$I_{E_{Last}}$ = während des Einschaltvorgangs höchster vom Lastwiderstand erzeugter Strom, R_{min} in Ω.

Wichtig bei der Festlegung der Widerstände ist die Berücksichtigung der Belastbarkeit, da im Beschaltungswiderstand erhebliche Wärmemengen auftreten. Deshalb sollte man stets hochbelastbare Widerstände verwenden. Die Belastbarkeit kann nach [2] für die Praxis genügend genau wie folgt berechnet werden:

$$P_R = k \cdot f \cdot \hat{u}_2^2 \cdot C;$$

$\hat{u}_2$ = Amplitude der Wechselspannung $u_2 \cdot \sqrt{2}$, C = Beschaltungskapazität, f = Netzfrequenz. Für den Faktor k gilt der Wert 1 für Einphasenschaltungen, 1,5 für Sternschaltungen und 2 für Drehstrombrückenschaltungen.

Es wäre noch zu erwähnen, daß das R-C-Schutzglied in unmittelbarer Nähe des Thyristors angebracht werden sollte.

Weitere Schutzmaßnahmen erreicht man durch Beschaltung der Sekundärwicklung des Netztransformators mit R-C-Gliedern oder durch Schutzbeschaltung der Last. Oftmals erweisen sich die errechneten Werte als zu groß. Dann müssen die günstigsten Größen von C und R experimentell ermittelt werden. Außer Widerständen und Kondensatoren können noch andere Bauelemente zur Schutzbeschaltung von Thyristoren verwendet werden. So ist es möglich, auch entgegengesetzt in Serie geschaltete Selengleichrichter und spannungsabhängige Widerstände einzusetzen. Man muß aber stets bei allen Bauelementen, die zur Schutzbeschaltung von Thyristoren verwendet werden sollen, darauf achten, daß unter Umständen recht erhebliche Rückströme auftreten und von den Bauelementen aufgenommen werden müssen. Auch an die nicht unerheblichen Wärmemengen und deren schnelle Abführung muß gedacht werden. Alles in allem müssen zur Schutzbeschaltung von Thyristoren äußerst leistungsstarke und zuverlässige Bauelemente ausgesucht werden.

6. Parallel- und Serienschaltung von Thyristoren

6.1. Parallelschaltung von Thyristoren

Um die Strombelastbarkeit von Thyristorgeräten zu erhöhen, kann man mehrere Thyristoren parallelschalten. Dabei treten 2 Probleme auf:

— gleichmäßige Stromaufteilung;
— sicheres Zünden der einzelnen Thyristoren.

Bei Parallelschaltung von Thyristoren muß man einen Parallelschaltungsfaktor, bedingt durch ungleichmäßige Stromaufteilung, beachten. Man kann also nicht einfach bei n Thyristoren die zulässige Strombelastbarkeit eines Thyristors ohne Parallelschaltung mit n multiplizieren. Der Parallelschaltfaktor kann mit nachstehender Formel ermittelt werden:

$$\text{Parallelschaltfaktor} = \frac{\text{zulässige Strombelastbarkeit}}{\text{n} \cdot \text{Grenzgleichstrom einer Stromrichterschaltung.}}$$

Dabei sollte der Parallelschaltfaktor nicht kleiner als 0,8 sein. Beim Parallelschalten von Thyristoren müssen wir auch den Spannungsabfall der Durchlaßspannung beachten. Der Durchlaßspannungsabfall ist stark von der Sperrschichttemperatur abhängig. Für einen Thyristortyp tritt bei einer bestimmten Temperatur ein breites Spektrum von Werten des Durchlaßspannungsabfalls auf. Aus diesem Spektrum werden die Halbleiterventile in entsprechende Durchlaßspannungabfallgruppen eingereiht. Die Differenz des Spannungsabfalls soll zwischen 70 und 100 mV liegen. Zur Parallelschaltung werden immer Thyristoren derselben Gruppe verwendet.

6.1.1. Gleichmäßige Stromaufteilung

Auch bei Thyristoren derselben Gruppe des Durchlaßspannungsabfalls erfolgt keine genaue Stromaufteilung bei direk-

ter Parallelschaltung. An später zündenden Thyristoren tritt im Einschaltmoment des ersten ein positiver du/dt-Wert auf, wodurch der noch nicht gezündete Thyristor zum Kippen gebracht werden kann. Diese Gefahr wird durch eine Beschaltung gemildert. In ganz ungünstigen Fällen können die Ströme von 2 parallelgeschalteten Thyristoren um ungefähr 50 bis 60 A differieren! Eine günstigere Stromaufteilung erreicht man durch kleine Widerstände (einige Milliohm), die mit den parallelgeschalteten Thyristoren in Reihe geschaltet werden. Oft reicht schon der Widerstand von den vorgeschalteten Sicherungen aus. Eine noch bessere Stromaufteilung erzielt man mit den sogenannten Stromteilerdrosseln. Bei mehrfacher Parallelschaltung werden die Drosseln zyklisch verkettet. Die miteinander gekoppelten Wicklungen unterbinden unterschiedliche Ströme und gleichen Spannungsabfälle aus. Die Drosseln dürfen dabei nicht in die Sättigung gehen. Bild 6.1 zeigt das eben erläuterte Prinzip.

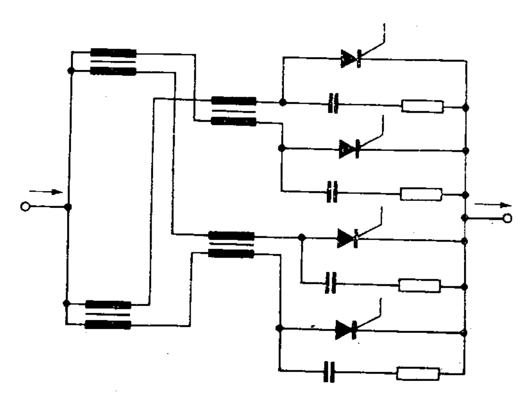


Bild 6.1 Anordnung von Stromteilungswandlern bei Parallelschaltung von Thyristoren

6.1.2. Sicheres Zünden der parallelgeschalteten Thyristoren

Parallelgeschaltete Thyristoren müssen möglichst einwandfrei und gleichzeitig zünden. Unterschiede bei den Einschaltzeiten der parallelgeschalteten Thyristoren können dadurch auftreten, daß nach dem Zünden des ersten Thyristors die Anoden-Katoden-Spannung für die parallelliegenden Halbleiterventile auf den Durchlaßspannungsabfall des schon stromführenden Thyristors zusammenbricht. Bei Anodenspannungen $< 1{,}5$ V steigt der benötigte Zündstrom steil an. Dabei kann es vorkommen, daß die folgenden Thyristoren später oder gar nicht zünden. Dann kann der erste Thyristor durch die Übernahme des gesamten Stromes überlastet oder gar zerstört werden. Durch Zündimpulse mit steilen Stirnflanken und hohen Amplituden werden unterschiedliche Einschaltzeiten vermieden. Mit den zur gleichmäßigen Stromaufteilung verwendeten Schaltmitteln erreicht man, daß die Anoden-Katoden-Spannung für die noch nicht gezündeten Thyristoren während des Zündvorgangs genügend hoch ist.

6.2. Serienschaltung von Thyristoren

Treten Arbeitsspannungen auf, die höher als die Spitzensperrspannung der Thyristoren sind, so können Thyristoren in Serie geschaltet werden. Parallel zu den in Serie geschalteten Thyristoren werden R-C-Glieder geschaltet, die eine gleichmäßige Spannungsaufteilung erzwingen. Bei reiner Gleichspannung werden noch parallel zu den RC-Gliedern ohmsche Widerstände zur Symmetrierung geschaltet. Bild 6.2 stellt das Prinzip einer solchen Beschaltung dar. Durch Streuung der Zündcharakteristiken ist ein genaues gleichzeitiges Zünden aller beteiligten Thyristoren oft nicht zu erreichen. Liegen die Zündzeitpunkte der in Serie geschalteten Thyristoren auch nur um einige Mikrosekunden auseinander, so treten am zweiten bzw. an den nachfolgenden Thyristoren Spannungsspitzen auf. Das bedeutet: Am zuletzt zündenden Thyristor liegt die gesamte Spannung. Es besteht nun die Gefahr, daß durch

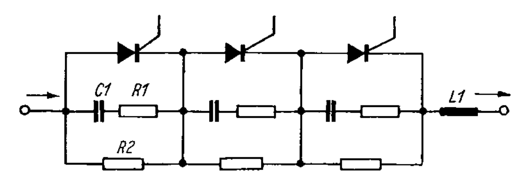


Bild 6.2 Beschaltung von in Serie geschalteten Thyristoren

Überschreiten der Nullkippspannung die Thyristoren zünden. Gleichzeitig können dabei noch die Thyristoren zerstört werden.

Bei einer Serienschaltung ist es deshalb zweckmäßig, Thyristoren zu wählen, die eine Spannungsklasse über der erforderlichen Sperrspannung liegen. Aus den genannten Gründen sollte man beim Aufbau von Thyristorschaltungen darauf achten, nie mehr als 2 Thyristoren in Serie zu schalten. Dadurch wird der Unsicherheitsfaktor beim Zünden in Serie geschalteter Thyristoren auf ein Minimum gesenkt.

7. Anwendung von Thyristoren

7.1. Zündschaltungen

Bevor wir zur eigentlichen Anwendung von Thyristoren kommen, wollen wir uns kurz mit den wichtigsten Zündschaltungen beschäftigen.

7.1.1. Horizontalsteuerung

Die zum Zünden eines Thyristors benutzte Steuerspannung liegt in der Regel nicht über eine halbe oder gar ganze Periode an. Die Zeitdauer der Steuerspannung während einer Halbperiode stellt man in den meisten Fällen auf einen genau festgelegten Wert ein, um so, wie wir später noch sehen werden, entsprechende Steuerwirkungen realisieren zu können. Die genannte Einstellung der Zündimpulsdauer erfolgt mit Zündschaltungen. Man bezeichnet nun den Winkel, um den der Zündzeitpunkt nach dem Nulldurchgang der Arbeitsspannung verzögert wird, als Zünd- oder Steuerwinkel α. Bei der Horizontalsteuerung erfolgt die Zündung durch einen Zündimpuls, der in der Phase verschoben ist. Er muß außerdem so groß sein, daß auch bei kleinen Anoden-Katoden-Spannungen (z. B. < 2 V) der Thyristor sicher gezündet wird. In Bild 7.1 ist das Zünden mit einer Wechselspannung U_{St} dargestellt, die mit einer einfachen Phasenbrücke gegenüber der Arbeitsspannung verschoben werden kann. Da die Verschiebung in der Horizontalen erfolgt, spricht man hier von einer Horizontalsteuerung. Durch Verändern des Widerstands in der Phasenbrücke kann die Steuerspannung U_{St} um etwa 170° bis 180° verschoben werden. Die Steuerspannung muß an der Steuerelektrode des Thyristors den Wert U_Z erreichen, damit der zum Zünden erforderliche Strom über die Steuerstrecke fließt und der Thyristor zündet.

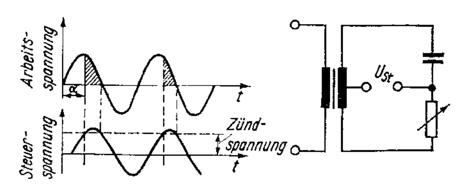


Bild 7.1 Horizontalsteuerung

7.1.2. Vertikalsteuerung

Bereits bei der Behandlung der charakteristischen Arbeitskennlinie des Thyristors (s. Abschnitt 4.1.) wurde gezeigt, daß die Kippspannung von der Größe des Steuerstroms abhängig ist. Bei einem Steuerstrom = 0 erfolgt die Zündung bekanntlich nur bei Überschreiten der Nullkippspannung. Mit steigendem Steuerstrom zündet der Thyristor bei kleiner werdenden Kippspannungen. Wenn nun die Höhe des Steuerstroms verändert wird, ist es möglich, Zündwinkel zwischen 0° und 90° einzustellen. Eine Aussteuerung > 90° ist nicht möglich, da an der 90°-Grenze ein instabiler Zustand auftritt. Bereits durch geringe Temperatur-, Spannungs- oder Steuerstromänderungen kann sich der eingestellte Zündwinkel stark verändern. Werden die Thyristoren als Stellglied in Regelschaltungen verwendet, so wird der Zündzeitpunkt meistens mit einer aus dem Regler hergeleiteten Gleichspannung eingestellt. In diesem Fall wird der Zündwinkel vielfach durch eine Wechselspannung verschoben, die einer veränderlichen Gleichspannung überlagert wird. Durch eine Veränderung der Gleichspannung wird die Wechselspannung vertikal nach oben oder unten verschoben und damit der Zündwinkel eingestellt. Aus diesem Grunde wird diese Art der Zündung als Vertikalsteuerung bezeichnet.

Da die Zündkennlinien verschiedener Exemplare gleichen Typs stark streuen und sehr temperaturabhängig sind, wird in der Praxis die Vertikalsteuerung nicht so häufig angewendet wie die Horizontalsteuerung.

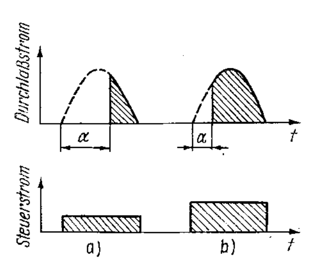


Bild 7.2 Vertikalsteuerung

7.1.3. Impulszündschaltungen

Eine Ansteuerung der Thyristoren mit steilen und schmalen Zündimpulsen bringt Vorteile. Bereits unter 3.1.5. wurde darauf hingewiesen, daß bei rein ohmscher Belastung die Breite des Zündimpulses von etwa 10 μs zur Zündung des Thyristors ausreicht. Bei den in der Praxis allgemein auftretenden Schaltungen liegen die Zündimpulsbreiten bei 100 bis 200 μs.
An Hand von Bild 7.3 wollen wir uns die Wirkungsweise einer solchen Impulszündschaltung erklären. Im Prinzip besteht eine Impulszündschaltung aus einer Impulsformerstufe und aus einem zeit- oder phasenabhängigen Glied. Die Impulsformerstufe wird dabei von dem zeitabhängigen Glied angeregt. Bei der in Bild 7.3 dargestellten Impulsformerstufe handelt es sich um eine monostabile Kippschaltung. Kernstück dieser Kippschaltung sind die Transistoren T1 und T2. Diese monostabile Kippschaltung wird durch einen Zündimpuls angeregt und damit aus ihrer Ruhelage gebracht. Der neue Betriebszustand der Schaltung dauert aber nur eine bestimmte Zeit, die von der Dimensionierung der Schaltung abhängig ist, danach wird der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt. Im Ruhezustand liegt an der Basis von T2 über R1 negatives Potential, und T2 ist leitend. Der Transistor T1 ist nicht leitend, da das positive Potential des Kollektors von T2 über R4 an seiner Basis liegt. C3 wird nun bei stromführendem T2 über R5 auf die Betriebsspannung aufgeladen. Die in Bild 7.1 angedeutete Phasen-

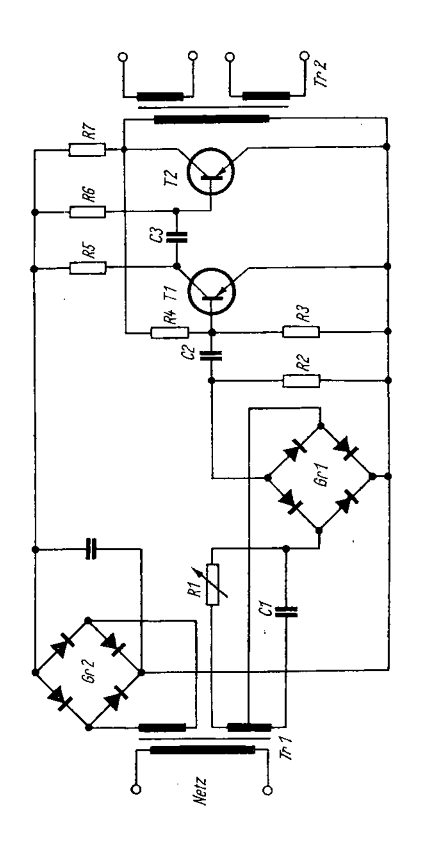


Bild 7.3 Prinzip einer Impulszündschaltung

brückenschaltung finden wir in dieser Schaltung wieder. Sie wird aus der unteren Wicklung des Transformators Tr1, aus C1 und dem veränderlichen Widerstand R1 gebildet. Mit R1 kann die Ausgangsspannung der Phasenbrücke bis ungefähr 170° zeitlich verschoben werden. Die Ausgangsspannung der Phasenbrücke wird nun noch umgeformt. Das geschieht durch Gleichrichter Gr1. Es entstehen dabei gleichgerichtete Halbwellenimpulse, die ihrerseits den Transistor T1 ansteuern. T1 wird leitend, d. h., der Kollektor hat positives Potential.

Der Kondensator C3 liegt mit seiner positiven Ladung (in Bild 7.3 rechter Belag von C3) an der Basis von T2. Damit wird T2 gesperrt, und zwar so lange, bis sich C3 über R6 umgeladen hat. Ist dies geschehen, so wird T2 wieder stromführend (rechter Belag von C3 jetzt negativ!), und die Schaltung kippt in ihren ursprünglichen Zustand zurück. Durch das Kollektorpotential von T2 wird T1 über R4 gesperrt. Am Kollektor des Transistors T2 entsteht ein Spannungssprung. Dieser wird über den Impulsübertrager Tr2 ausgekoppelt und als Zündimpuls auf den Thyristor geschaltet. Die Breite des Zündimpulses wird durch entsprechende Wahl von C3 und R6 bestimmt.

7.1.4. Zündschaltung für Drehstromschaltungen

Für mit Thyristoren bestückte Drehstromschaltungen werden zum Zünden um 120° gegeneinander verschobene Zündimpulse mit einem Impulsabstand von 180° benötigt. Es wird für jede Phase ein Zündgerät verwendet. Die 3 Zündgeräte werden allerdings zur Phasenverschiebung gemeinsam angesteuert. Die Verteilung der Zündimpulse auf die jeweiligen Thyristoren bei einer Drehstrombrückenschaltung soll an Hand von Bild 7.4 erläutert werden. In dieser Schaltung befinden sich 6 Thyristoren, die entsprechend sinnvoll durch Zündimpulse angesteuert werden müssen. Es werden während einer Periode, also 360°, 6 um 60° auseinanderliegende Impulse benötigt. In

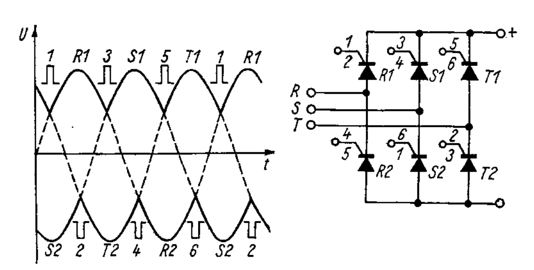


Bild 7.4 Prinzip einer Drehstromzündschaltung

Bild 7.4 sind diese Zündimpulse der Reihe nach numeriert. Die Steuerelektroden der 6 Thyristoren sind mit den dazugehörigen Impulsnummern gekennzeichnet. Während einer Periode führt jeder Thyristor 120° lang Strom. Gleichzeitig stromführend ist jeweils für 60° einer der beiden gegenüberliegenden Thyristoren. So ist z. B. der Thyristor R1 60° mit Thyristor S2 leitend und danach 60° mit Thyristor T2 als Gegenphase. Wir wollen einmal kurz ein Beispiel konstruieren, bei dem die genannte Schaltung genau bei Stromnulldurchgang eingeschaltet werden soll. Außerdem soll der Einschaltzeitpunkt mit dem Impuls 1 zusammenfallen. Der Thyristor R1 soll mit dem Impuls 1 gezündet werden. Es wird aber keine Zündung erfolgen, da der Thyristor S2 in der Gegenphase nicht stromführend ist. Auch der folgende Impuls 2 wird den Thyristor T2 nicht zünden, weil Thyristor R1 nicht gezündet wurde und er keinen Strom führt. Nur wenn die Zündimpulse etwas breiter als 60° sind, läßt sich die Schaltung einschalten. Im zuletzt genannten Fall liegt der Zündimpuls 1 noch an, wenn der Thyristor T2 mit dem Impuls 2 gezündet wird. Jetzt läßt sich die Schaltung einschalten, da die Thyristoren R1 und T2 gleichzeitig gezündet werden und damit Strom führen. Eine weitere Möglichkeit des Einschaltens ergibt sich, wenn jedem Zündimpuls für einen Thyristor mit 60° Abstand ein zweiter Impuls folgt. In diesem Fall würden auf die Steuerelektrode des Thyristors R1 die Zündimpulse 1 und 2 geschaltet werden. Oft macht man es so, daß die Impulsübertrager mit einer zweiten Sekundärwicklung versehen werden. Dadurch wird das Aufschalten 1 Impulses auf die Zündelektroden von 2 Thyristoren galvanisch getrennt erreicht.

7.2. Kühlung von Thyristoren

Bei allen Geräten und Anlagen, die mit Halbleiterbauelementen bestückt sind, ist nur ein einwandfreier Betrieb gewährleistet, wenn die zulässigen Temperaturgrenzen eingehalten werden. Deshalb ist gerade die Kühlung bzw. Wärmeableitung besonders wichtig. Silizium-Thyristoren haben einen hohen

Wirkungsgrad. Dieser liegt bei ungefähr 99% (bei Nennspannung und Typenstrom). Die relativ geringen Verluste entstehen in der kleinflächigen Siliziumtablette, so daß sich eine hohe spezifische Verlustbelastung ergibt. Soll der Grenzwert der zulässigen Tablettentemperatur nicht überschritten werden, so muß die Wärme über einen entsprechend großen Kühlkörper an das jeweilige Kühlmittel abgeleitet werden.

7.2.1. Angepaßte Kühlkörper

Der zulässige Dauerstrom eines Thyristors wird durch den zulässigen Gesamtverlust P_V bestimmt. Man berechnet P_V aus der zulässigen Tablettentemperatur $\Delta\vartheta_T$ und dem statischen Gesamtwärmewiderstand $R_{W\,Ges}$. Es gilt dafür folgende Beziehung:

$$P_V = \frac{\Delta\,\vartheta_T}{R_{W\,Ges}} \quad \text{mit } R_{W\,Ges} = R_{wi} + R_{wü} + R_{wk}$$

Die Tablettengrenztemperatur ist in der Regel vorgegeben. Damit ist praktisch der zulässige Gesamtverlust allein von dem Kühlkörperwärmewiderstand R_{wk} abhängig. Mit R_{wi} ist der innere Wärmewiderstand bezeichnet. Wir verstehen darunter den Materialwärmewiderstand zwischen Siliziumtablette und äußerem Gehäuseboden. Der innere Wärmewiderstand R_{wi} wird in grd/W angegeben. $R_{wü}$ ist der Wärmeübergangswiderstand. Darunter ist der Wärmewiderstand zwischen Gehäuseboden und Kühlkörper zu verstehen. $R_{wü}$ ist in der Hauptsache abhängig von der Größe und der Güte der Kontaktflächen und vom Anpreßdruck. Beide, der innere Wärmewiderstand R_{wi} und der Wärmeübergangswiderstand $R_{wü}$, sind Festwerte. Bei Kühlung durch Selbstbelüftung gilt in der Regel:

$$R_{wü} < R_{wi} + R_{wk}$$

Je kleiner aber der Kühlkörperwärmewiderstand R_{wk} oder, auch anders ausgedrückt, je intensiver die Kühlung, desto mehr gewinnt der Übergangswiderstand $R_{wü}$ an Bedeutung. Deshalb ist bei Fremdbelüftung auf besonders guten Sitz der Thyristoren zu achten. Unter dem Kühlkörperwärmewider-

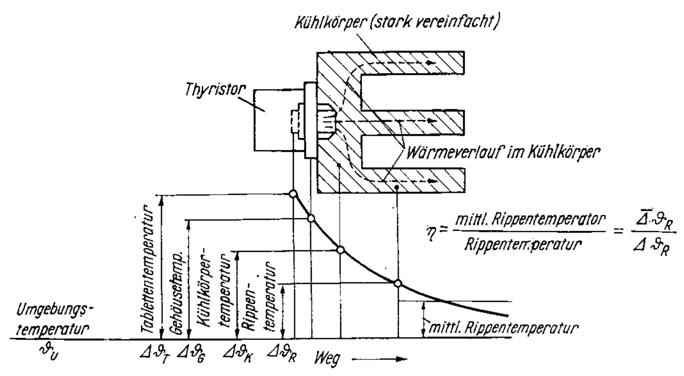


Bild 7.5 Temperaturverlauf im Thyristor und im dazugehörigen Kühlkörper

stand R_{wk} selbst verstehen wir den Wärmewiderstand zwischen der Auflagefläche des Halbleiterbauelements und dem Kühlmedium. Die Verlustwärme eines Thyristors fließt über die Grundplatte in die Kühlrippen und wird von diesen an das Kühlmedium abgegeben. Es stellt sich dabei ein Temperaturgefälle ein, das im wesentlichen abhängig ist von der Größe des Verlustes P_V, von der Dicke sowie von der Wärmeleitfähigkeit des Materials und von der Intensität der Kühlung (dargestellt durch die Wärmeübergangszahl α mit der Einheit W/m^2 grd). Man kann also R_{wk} als Kombination von R_{wi} und $R_{wü}$ bezeichnen. In Bild 7.5 ist das Temperaturgefälle eines Thyristors mit Kühlkörper dargestellt.

Der zulässige Gesamtverlust P_V wird, zunächst unter Vernachlässigung des Temperaturabfalls in der Grundplatte, durch die Kühlleistung $n \cdot P_{KR}$ der n Kühlrippen (n = Anzahl der Kühlrippen) bestimmt.

$$P_V \approx n \cdot P_{KR} = n \cdot A_R \cdot \alpha \cdot \bar{\Delta}\,\vartheta_R$$
$$= n \cdot A_R \cdot \alpha \cdot \eta \cdot \Delta\,\vartheta_R$$

Daraus läßt sich der Wärmewiderstand einer Kühlrippe mit der Gesamtfläche A_R berechnen.

$$R_{WR} = \frac{\Delta\,\vartheta_R}{P_{KR}} = \frac{1}{A_R \cdot \alpha \cdot \eta}$$

η ist der Rippenwirkungsgrad. Er ist abhängig von der Stärke und der Form der Rippe, von der Wärmeleitfähigkeit λ des Materials und der Wärmeübergangszahl. So müssen z. B. Rippen aus Aluminium wegen ihrer schlechteren Wärmeleitfähigkeit ungefähr doppelt so dick sein wie gleich große Rippen aus Kupfer, damit der gleiche Wirkungsgrad erzielt wird. Bei großen, hauptsächlich fremdbelüfteten Kühlkörpern dürfen die Grundplattenwiderstände nicht vernachlässigt werden. Die Kühlleistung beträgt dann:

$$P_V = P_K = \frac{\Delta \vartheta_K}{R_{wk}}$$

Für jeden Kühlkörper gibt es eine optimale Größe. Die Thyristorhersteller bieten für die meisten ihrer Typen bereits entsprechende Kühlkörper an, so daß sich für den Anwender von Thyristoren weitere Überlegungen oder gar Berechnungen erübrigen. In Bild 7.6 ist ein für die Thyristoren vom Typ T 16 und T 25 empfohlener ČKD-Kühlkörper A 65 dargestellt. Von einem angepaßten Kühlkörper spricht man dann, wenn ein optimal bemessener Kühlkörper bei einem Minimum an Gewicht und Raum ein Maximum an Kühlleistung bringt. Beim Entwurf von Kühlkörpern muß folgendes beachtet werden: Die Ausführung soll stabil und korrosionsbeständig sein. Die Rippenabstände sollten nicht zu klein gewählt werden.

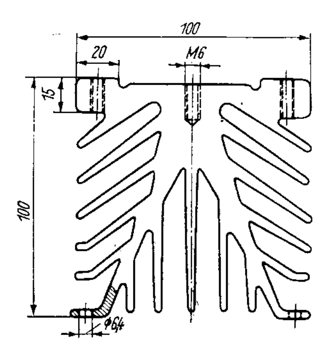


Bild 7.6 ČKD-Kühlkörper A 65 für die Thyristortypen T 16 und T 25

Dadurch erreicht man bei Fremdbelüftung einen geringen Druckabfall und weiterhin bei übereinander angeordneten Kühlkörpern eine gleichmäßige und gute Kühlung bei wirtschaftlichem Lüfteraufwand.

7.2.2. Kühleigenschaften bei Selbst- und Fremdbelüftung

Bei Selbstbelüftung:
In diesem Fall werden die Wärmeverluste ohne Hilfsmittel abgeführt, d. h. nur durch Strahlung und vertikale Luftströmung (Konvektion). Die meisten Hersteller von Kühlkörpern geben für die Kühlkörper Diagramme an, wie in Bild 7.7 angedeutet. Aus diesem Diagramm kann der Kühlkörperwärmewiderstand R_{wk} einschließlich Übergangswiderstand $R_{wü}$ in Abhängigkeit von den abgeführten Verlusten P_V entnommen werden. In dem Diagramm sehen wir noch eine zweite Kurve. Sie stellt die Abhängigkeit der Gehäuseübertemperatur $\Delta\,\vartheta_G$ von den Verlusten dar. An Hand von Bild 7.7 kann man erkennen, daß mit wachsenden Verlusten der Wärmewiderstand abnimmt. Mit wachsenden Verlusten steigt aber auch die Temperatur des Kühlkörpers. Durch diesen Umstand wird die Wärmeabfuhr durch Konvektion und Strahlung besser! Die Kühlkurven gelten nur unter ganz bestimmten Bedingungen: Die Kühlrippen müssen senkrecht stehen, die Kühlluft soll ungehindert zu- und abströmen können, und es muß ein Wärmestau durch benachbarte Bauteile verhindert werden. Es ist sehr günstig, wenn die Kühlkörper nur in einer Etage angeordnet werden. Sind 2 Etagen direkt übereinander angeordnet,

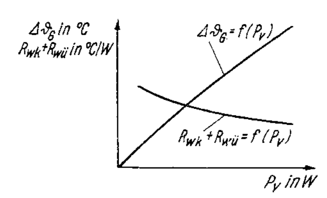


Bild 7.7 Wärmewiderstand und Gehäusetemperatur als Funktion der Verlustleistung

so muß man für die obere Etage mit erhöhten Umgebungstemperaturen rechnen. Diese höheren Umgebungstemperaturen entstehen durch die Aufwärmung der Kühlluft. Mehr als 2 Etagen niemals ohne zusätzliche Lüfter bzw. größere Abstände ($\geq$ 20 cm) direkt übereinander anordnen! Die höchste Gehäusetemperatur der obersten Etage ist dabei als Maß für die Belastung zu nehmen.

Bei Fremdbelüftung:

Bei Fremdbelüftung muß in jedem Fall ein Lüfter vorhanden sein. Auf die Auswahl der Lüfter soll in diesem Heft nicht näher eingegangen werden. Es sei nur so viel gesagt, daß die Lüfterkennlinie der Luftwiderstandskennlinie des Kühlkörpers angepaßt werden muß, damit auch die erforderliche Kühlluftmenge durch das Kühlsystem gefördert wird. Weiterhin ist zu beachten, daß der Lüfter in einer ausreichenden Entfernung von den Kühlkörpern angeordnet wird, damit die Luft möglichst gleichmäßig durch alle Kühlkörper bewegt wird. Es interessieren bei der Fremdbelüftung besonders die Abhängigkeit des Kühlkörperwärmewiderstands R_{wk} einschließlich Übergangswiderstand $R_{wü}$ von der Kühlluftmenge V und außerdem der statische Druckabfall, der sich bei der genannten Kühlluftmenge einstellt. Zu beachten ist, daß bei n Kühlkörpern einer Etage die n-fache Kühlluftmenge benötigt wird, als dies für einen Kühlkörper der Fall ist. Der Druckabfall jedoch bleibt nach wie vor der eines Kühlkörpers. Das hat aber nur Gültigkeit für einen Kühlluftstrom ohne spürbare Nebenluft. In der Praxis muß man allerdings in den meisten Fällen mit Nebenluft rechnen. Es ist sogar günstig, Nebenluft als Kühlluft zufließen zu lassen, weil dadurch die Luftaufwärmung zwischen den einzelnen Etagen gemindert wird. Zum Bestimmen der Luftaufwärmung je Etage genügt folgende Faustformel:

$$\Delta \vartheta_L = \frac{P_V}{1{,}2 \cdot V};$$

$\Delta \vartheta_L$ in °C, P_V = gesamte von einem Kühlkörper angeführte Verluste in W, V = Kühlluftmenge je Kühlkörper in l/s.

7.2.3. Berechnung von selbstbelüfteten Kühlblechen

Bei einer eventuellen Selbstherstellung von Kühlkörpern wird es sich in den meisten Fällen um Kühlbleche handeln. Um selbstbelüftete Kühlbleche berechnen zu können, wollen wir ein von [2] angegebenes Verfahren benutzen. Für die nachstehend genannten Formeln gibt es eine Einschränkung. Sie haben nur unter folgenden Bedingungen volle Gültigkeit:

- Der Thyristor muß im Zentrum des Kühlblechs angebracht sein (oder nicht weit davon).
- Das Verhältnis der Seiten soll bei rechteckigen Blechen nicht größer als 1:3 sein.
- Die Kühlbleche müssen senkrecht stehen. Es können durchaus mehrere Bleche nebeneinander angeordnet werden (Bild 7.8).

Zunächst wird der Wärmewiderstand des Kühlblechs bestimmt. Er wurde bereits unter 7.2.1. erwähnt. Die Formel für die Berechnung des Wärmewiderstands eines Kühlblechs lautet dann:

$$R_{\text{wk Kühlblech}} = \frac{1}{A \cdot \alpha \cdot \eta}.$$

A ist die Gesamtoberfläche, die sich aus 2mal der Länge l, multipliziert mit der Höhe h, ergibt. Die Gesamtoberfläche ist mit m² in die Formel einzusetzen. α ist die resultierende Wärmeübergangszahl in W/m² grd. η ist der Rippenwirkungsgrad, der den Temperaturabfall im Kühlblech berücksichtigt.

$$\eta = \frac{\overline{\Delta\,\vartheta_R}}{\Delta\vartheta_R} \text{ (s. a. Bild 7.5).}$$

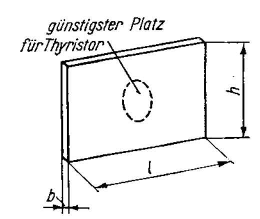


Bild 7.8 Günstigster Platz des Halbleiterbauelements auf dem Kühlblech

Die Wärmeübergangszahl α setzt sich aus 2 Komponenten zusammen. Diese beiden Komponenten resultieren aus der Abführung der Wärme, die durch Strahlung und durch Konvektion erfolgt;

$$\alpha = \alpha_S + \alpha_K.$$

Für die Praxis genügend genau kann mit der nun folgenden Formel die Wärmeübergangszahl für Strahlung berechnet werden:

$$\alpha_S = 0{,}23 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon\,(1 - \varphi) \left[\frac{\vartheta_K + \vartheta_U}{2} + 273\right]^3;$$

α_S in $\frac{W}{m^2\,grd}$.

Es bedeuten:

ϑ_K = mittlere Kühlblechtemperatur. Es kann dafür auch hinreichend genau die Gehäusetemperatur ϑ_G eingesetzt werden, allerdings unter der Bedingung, daß der Rippenwirkungsgrad $\eta > 0{,}9$ und $R_{wü}$ klein gegenüber R_{wk} ist;

ϑ_U = Umgebungstemperatur in C°;

ε = Emissionsverhältnis der Blechoberfläche. Dieser Wert ist abhängig vom Material und von der Beschaffenheit der Oberfläche. Das Emissionsverhältnis liegt bei Werten zwischen 0,04 und ungefähr 0,9. Für Aluminiumblech, roh oder oxydiert, ist $\varepsilon \approx 0{,}07$, poliert $\approx 0{,}05$. Für Kupferblech, schwarz oxydiert, ist $\varepsilon \approx 0{,}75$, poliert $\approx 0{,}04$. Sind die Aluminium- bzw. Kupferbleche lackiert (Farbe beliebig), so ist $\varepsilon \approx 0{,}9$;

φ = Einstrahlzahl zwischen gleich großen, nebeneinander angeordneten Kühlblechen etwa gleicher Temperatur. Die Einstrahlzahl ist dimensionslos. Sie kann in Abhängigkeit von den Blechabmessungen und dem Kühlblechabstand entsprechenden Diagrammen entnommen werden. Bei nur einem Kühlblech und genügend großem Abstand zu anderen Bauelementen ist $\varphi = 0$. Bei kleinem Abstand und unbekannter Temperatur der umgebenden Bauelemente kann φ nur geschätzt werden.

Wir wollen nun die Wärmeübergangszahl für Konvektion berechnen. Es gilt dafür die Beziehung:

$$\alpha_K = 1{,}3 \sqrt[4]{\frac{\Delta\, \vartheta_K}{h}};$$

α_K in $\frac{W}{m^2\, grd}$, $\Delta\vartheta_K$ = mittlere Übertemperatur des Kühlblechs. Sie ergibt sich aus der Differenz von Kühlblech- und Umgebungstemperatur $\Delta\, \vartheta_K = \vartheta_K - \vartheta_U$ (angegeben in grd). Unter der Bedingung, daß $\eta > 0{,}9$ und $R_{wü} \ll R_{wk}$ ist, kann auch hier wieder statt $\Delta\, \vartheta_K$ die Gehäuseübertemperatur $\Delta\, \vartheta_G$ eingesetzt werden. Die Kühlblechhöhe h ist in Metern in die obige Formel einzusetzen.

Der Rippenwirkungsgrad η ist abhängig von der resultierenden Wärmeübergangszahl, von der Wärmeleitfähigkeit des Materials, von der Dicke des Kühlblechs und schließlich von der Größe des auf dem Kühlblech befestigten Thyristors. In der Regel rechnet man bei Selbstbelüftung für den Rippenwirkungsgrad mit Werten größer 0,9. Mit stärker werdendem Kühlblech sinkt der Einfluß der Rippendicke auf die Kühlung. Man sollte deshalb das Kühlblech nicht aus zu dünnem Material wählen.

Am Schluß der Betrachtungen über die Kühlprobleme sei noch auf 2 Diagramme hingewiesen, die das Berechnen von Kühl-

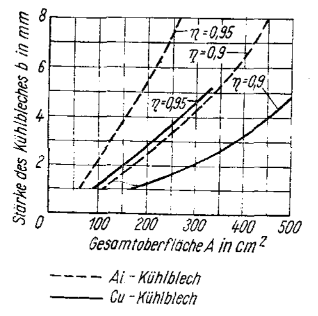


Bild 7.9 Diagramm zur Ermittlung der benötigten Kühlblechdicke bei Selbstbelüftung

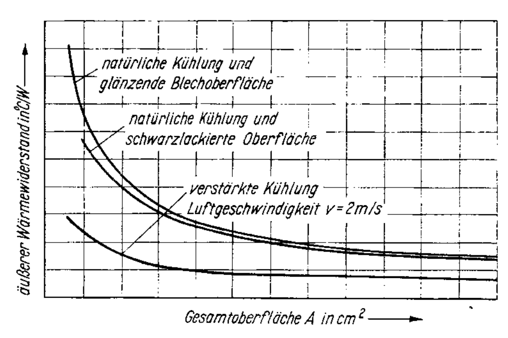


Bild 7.10 Abhängigkeit des thermischen Widerstands der Kühlbleche von ihrer Fläche

blechen erleichtern helfen sollen. Bild 7.9 soll uns helfen festzustellen, wie dick ungefähr das Kühlblech sein darf, damit die Bedingung $\eta > 0{,}9$ auch erfüllt wird. Mit diesem Diagramm erhält man brauchbare Ergebnisse für α-Werte von 5 bis 15 $W/m^2 \cdot grd$ und für einen Bodendurchmesser der Thyristoren größer als 8 mm. Bild 7.10 zeigt uns die Abhängigkeit des Wärmewiderstands der Kühlbleche von ihrer Fläche. Die beiden oberen Kurven gelten für Selbstbelüftung, während die untere Kurve für Fremdbelüftung bei einer Luftgeschwindigkeit von 2 m/s gilt. Bei der Festlegung der Stärke des Kühlblechs muß unbedingt die Länge des Gewindes berücksichtigt werden. Es gibt Thyristortypen mit relativ kurzem Gewindezapfen. Diese Thyristoren können deshalb nicht auf ein beliebiges Kühlblech aufgeschraubt werden. In der Praxis haben sich Kupferbleche von 2 mm oder Aluminiumbleche von 3 mm Stärke als sehr günstig erwiesen.

7.3. Anwendung in Gleichstromkreisen

7.3.1. Selbstgeführte Wechselrichter

Mit Wechselrichtern ist es möglich, eine Gleichspannung so umzuformen, daß auch Wechselstromverbraucher versorgt

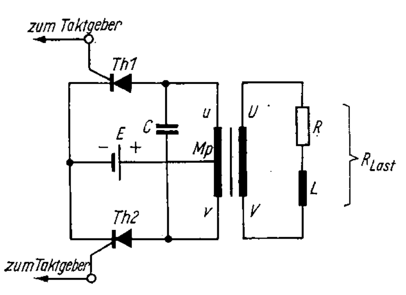


Bild 7.11 Prinzip des Wechselrichters (selbstgeführt)

werden können. Ein selbstgeführter Wechselrichter arbeitet so, daß er Frequenz und Höhe der Ausgangsspannung selbst bestimmt. Man erreicht dies dadurch, daß man den Wechselstromverbraucher über Thyristoren mit wechselnder Polung im Takt der erforderlichen Frequenz an die Gleichspannungsquelle anschließt. Die gewünschte Höhe der Wechselspannung erreicht man dann ganz einfach durch einen Transformator. Bild 7.11 zeigt das Prinzipschaltbild eines selbstgeführten Wechselrichters. Wie wir aus dem Bild ersehen können, besteht ein Wechselrichter im Prinzip aus 1 Transformator in Mittelpunktschaltung, 2 Thyristoren und 1 Taktgeber. Mit dem Taktgeber erhält man Impulse gewünschter Frequenz für die Ansteuerung der beiden Thyristoren Th1 und Th2. Durch abwechselndes Zünden der beiden Thyristoren fließt in den Teilwicklungen $Mp - u$ bzw. $Mp - v$ ein Strom jeweils in entgegengesetzter Richtung. Dies ist jedoch nur möglich, wenn stets nur 1 Thyristor geöffnet und der andere gesperrt ist; d. h. also, mit dem Steuerimpuls für Thyristor Th2 muß gleichzeitig der Strom durch Th1 abgebaut werden. Man erreicht dies durch den Kondensator C, auch Kommutierungskondensator genannt. Durch die Spartransformatorwirkung der Primärwicklung $u - Mp - v$ des Transformators wird, während durch Th1 ein Strom fließt, C auf die doppelte Spannung der Gleichspannungsquelle aufgeladen. Wenn Th2 durch einen Steuerimpuls gezündet wird, kann sich C über die beiden Thyristoren entladen. In Th1 ist dabei allerdings die Richtung des

Entladestroms entgegengesetzt. Der Thyristor 1 hat seine Sperrfähigkeit wieder erreicht, wenn die Summe der beiden Ströme gleich 0 ist. C wird nun in umgekehrter Richtung wieder aufgeladen.
Um einen einwandfreien Betrieb zu erzielen, muß man die in Bild 7.11 gezeigte Schaltung noch erweitern. Beide Thyristoren sind während der Kommutierung für kurze Zeit gleichzeitig geöffnet. Das bedeutet, daß beide Teile der Primärwicklung des Transformators gegensinnig vom Strom durchflossen werden. Die durch den Strom erzeugten magnetischen Flüsse sind ebenfalls gegensinnig, so daß es zu einem starken Stromanstieg des gesamten Gleichstroms kommen kann. Dieser eventuelle Stromanstieg wird durch das Einfügen einer Drossel begrenzt. Durch ein zusätzliches Hinzufügen zweier sogenannter *Seriendioden* verhindert man ein vorzeitiges Entladen des Kondensators C. Da die Belastung des Wechselrichters meist nicht rein ohmisch, sondern induktiv sein wird, muß die Schaltung noch durch 2 weitere Dioden ergänzt werden. Diese Ergänzung ist deshalb notwendig, weil bei induktiver Belastung der Laststrom nach der Stromumkehr noch in der alten Richtung weiterfließen will (Bild 7.12). Auf der Gleichstromseite ist aber durch den bereits gesperrten Thyristor 1 der Stromweg unterbrochen, so daß der Strom einen anderen Weg nehmen muß. Durch gegenparallel geschaltete Dioden wird dies erreicht.

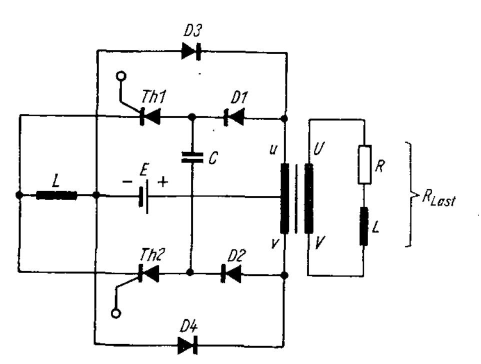


Bild 7.12 Wechselrichter in Mittelpunktschaltung

Da es sich um einen Blindstrom handelt, der durch die beiden Dioden geht, werden diese auch als *Blindstromdioden* bezeichnet. Ebenso wie sich diese Dioden für induktive Belastung eignen, sind sie auch für kapazitive Belastung geeignet. Wie bereits erwähnt, tritt an C die doppelte Gleichspannung auf und damit auch an den Thyristoren. Sie kann sogar noch größere Werte, bedingt durch Schwingungsvorgänge des Kondensators und die Streureaktanz des Transformators, erreichen. Bei der Wahl der Gleichspannung ist deshalb auf die Sperrfähigkeit der Thyristoren zu achten. Induktivität und Kondensator werden nach folgenden Formeln dimensioniert:

$$L = \frac{E \cdot t_s}{0{,}2\, I_d} \qquad C = \frac{I_d \cdot t_s}{U_c} \cdot 20 \; (t_s > t_f)$$

t_s ist die Zeit, nach der eine Spannungsbeanspruchung in Durchlaßrichtung erfolgen soll. t_f ist die Freiwerdezeit des Thyristors. U_c ist die Spannung am Kondensator. Sie ist 2mal E bei Mittelpunktschaltung. Mit I_d ist der Mittelwert des Gleichstroms gemeint.
Außer der hier beschriebenen Mittelpunktschaltung gibt es noch weitere Schaltungsvarianten für selbstgeführte Wechselrichter, z. B. die Brückenschaltung und Schaltungen mit Drehstromausgang. Als Taktgeber für Wechselrichter kleinerer Leistung kann man einen einfachen Rechteckimpulsgenerator verwenden. Für Wechselrichter größerer Leistung werden leistungsstarke Steuerimpulse mittels besonderer Impulserzeugerstufen gebildet.

7.3.2. Schnelle Schalter in Gleichstromkreisen

In der Praxis besteht häufig die Forderung, daß Stell- oder Schaltmagneten innerhalb einer sehr kurzen Zeit ansprechen. In Bild 7.13 ist so ein schneller Schalter mit Thyristoren dargestellt. Grundprinzip der ganzen Schaltung ist, einen Kondensator auf das Mehrfache der Betätigungsspannung des jeweiligen Magneten aufzuladen. Mit dem zum entsprechenden Zeitpunkt ausgelösten Entladestromstoß des Kondensators

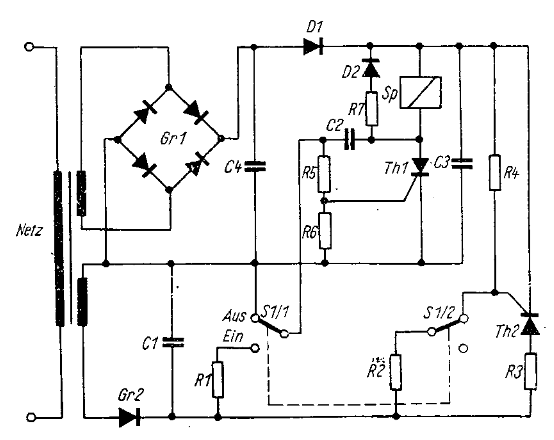


Bild 7.13 Schneller Schalter mit Thyristoren

erreicht man sehr kurze Ansprechzeiten (Bild 7.13). Über den Thyristor 1, der als Schalter fungiert, erhält die Magnetspule Sp vom Gleichrichter Gr1 ihre normale Betätigungsspannung. Der Gleichrichter Gr2 liefert die Gleichspannung zum Aufladen des Kondensators C1. Diese Spannung ist 5mal größer als die normale Betätigungsspannung. Befindet sich der Schalter S1 in der Stellung *Aus*, dann fließt über Widerstand R2, Schaltebene S1/2 und Steuerelektrode von Th2 ein Strom, der den Kondensator C3 auflädt. Dieser Strom zündet gleichzeitig Th2. Jetzt wird C3 über R3 (Schutzwiderstand) auf die an C1 liegende Spannung aufgeladen. R3 dient zur Strombegrenzung. Th2 ist auf diese Weise vor zu hohen Anfangsladeströmen geschützt. Die an der Steuerelektrode von Th2 anliegende Spannung läßt sich mit R4 einstellen. Mit größer werdender Aufladung von C3 wird der Ladestrom selbst kleiner. Er hört schließlich bei vollendeter Aufladung ganz auf. Damit wird, wie in den ersten Kapiteln bereits erklärt, mit Unterbrechung des Stromes der Thyristor Th2 gesperrt. Durch den Einschaltbefehl, d. h. S1 in Stellung *Ein*, fließt in dem Kreis R1, S1/1, R5 und der Steuerelektrode von Th1 ein Strom. Th1 wird leitend. Dadurch kann sich nun C3 stoßartig über Magnetspule

und Thyristor 1 entladen. Durch die hohe Spannung von C3 spricht Sp sehr schnell an. Nachdem sich C3 entladen hat, wird die Diode Dl leitend. Dies geschieht zu dem Zeitpunkt, an dem die Spannung an C3 unter den Wert der normalen Betätigungsspannung gesunken ist. Ab da sorgt Grl für den Stromfluß durch Sp und Thl. Mit R6 wird die notwendige Steuerspannung für Thl eingestellt. Mit der Stellung *Ein* des Schalters Sl wird gleichzeitig über Sl/2 die Steuerspannung von Th2 abgeschaltet.
C2 ist der sogenannte *Löschkondensator*. Er wird über Rl, Sl/l und Thl auf die an Cl liegende Spannung aufgeladen. Soll nun die Magnetspule Sp wieder abgeschaltet werden, so muß der Schalter Sl in die Stellung *Aus* gebracht werden. C2 kann sich damit über Sl/l und Thl entladen. Hat der Entladestrom den Wert des Haltestroms von Thl unterschritten, so wird der Thyristor gesperrt. Um die durch das schnelle Abschalten der Magnetspule entstehenden großen Spannungsspitzen begrenzen bzw. unterdrücken zu können, hat man parallel zur Magnetspule eine Diode, die *Freilaufdiode*, geschaltet. Die in der Spule gespeicherte Energie kann dann während des Abschaltvorgangs sehr rasch über R7 und D2 abgebaut werden. Der Magnet schaltet um so schneller ab, je größer R7 ist. Der Maximalwert von R7 wird durch den an ihm auftretenden Spannungsabfall bestimmt. Die Summe der Spannungen, die von Gr2 und vom Spannungsabfall über R7 gebildet wird, darf nicht größer sein als die für den Thyristor zugelassene Spitzensperrspannung. Mit der Schalterstellung *Aus* wird wieder über Sl/2 eine Spannung an die Steuerelektrode von Th2 gelegt. C3 wird, wie bereits oben beschrieben, wieder aufgeladen. Damit ist die Bereitschaft der Schaltung für eine erneute Betätigung des Magneten wiederhergestellt. Den dargestellten Schalter Sl kann man selbstverständlich auch mit elektronischen Bauelementen realisieren.
Zum Schluß dieser Betrachtungen sei noch auf einen Anwendungsfall aus der Praxis hingewiesen. Um schnell verlaufende Vorgänge beobachten zu können, benutzt man häufig ein Blitzstroboskop. Dabei werden sehr hohe Blitzfrequenzen benötigt. Mit mechanischen Kontakten lassen sich oft solche

hohen Schaltfrequenzen schwer oder gar nicht realisieren. Man setzt deshalb zum Auslösen der Blitzröhre statt der üblichen mechanischen Kontakte Thyristoren als schnelle Schalter ein.

7.3.3. *Gleichstromsteller*

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit von Thyristoren in Gleichstromkreisen finden wir in Form der Gleichstromsteller. Gleichstromsteller werden dann angewendet, wenn bei vorhandener fester Gleichspannung kontaktlos und verlustarm eine von 0 bis 100 % steuerbare Gleichspannung erzeugt werden soll. In Bild 7.14 ist das Prinzip eines solchen Gleichstromstellers dargestellt. Ist der Schalter S geschlossen, so liegt die Spannung E der Gleichspannungsquelle am Verbraucherwiderstand (dieser soll sich aus einem induktiven und einem ohmschen Bestandteil zusammensetzen), und der Strom steigt entsprechend der Zeitkonstante L/R an. Mit dem Öffnen von S verschwindet selbstverständlich die Spannung an dem Verbraucherwiderstand. Der Strom kann aber trotzdem weiterfließen, und zwar über die Freilaufdiode D_f. Er klingt entsprechend der Zeitkonstante der Last bzw. des Verbraucherwiderstands ab. Es ist nun möglich, mit S den Mittelwert der Spannung am Verbraucher zu steuern. Um dies zu erreichen, muß S in einer konstanten oder veränderlichen Taktfolge periodisch geschlossen und geöffnet werden. Auf Grund der relativ hohen Schaltfrequenz (ungefähr 400 Hz) sind mechanische Schalter ungeeignet. Weitaus besser eignen sich dafür Thyristoren. Bei Verwendung von Thyristoren ist allerdings eine Löschvor-

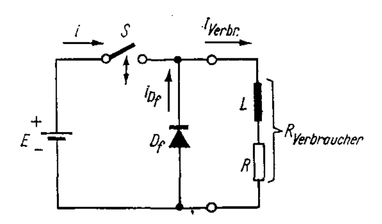


Bild 7.14 Prinzip des Gleichstromstellers

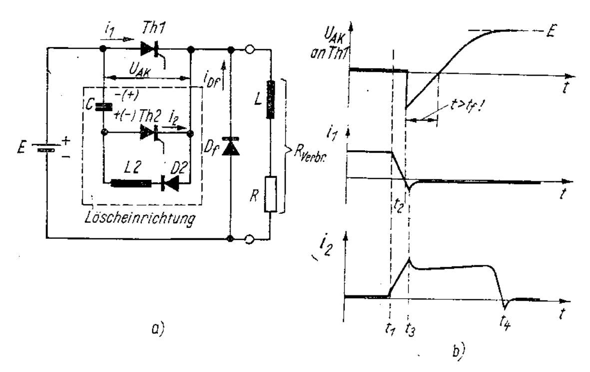


Bild 7.15 Gleichstromsteller; a — Gleichstromsteller mit Löscheinrichtung, b — Strom- und Spannungsverhältnisse

richtung erforderlich, da ja bekanntlich ein Thyristor über seine Steuerelektrode nicht mehr beeinflußt werden kann, wenn er erst einmal gezündet wurde. Die Wirkungsweise der Löscheinrichtung wollen wir uns an Hand von Bild 7.15 klarmachen. Bild 7.15a zeigt die Prinzipschaltung der Löscheinrichtung. Wird Thyristor Th2 gezündet, so fließt ein Teil des Batteriestroms (i_2) über C und Thyristor Th2. Der Kommutierungsvorgang in der Zeit t_1 bis t_3 (Bild 7.15b) spielt sich in ähnlicher Weise ab wie beim netzgeführten Stromrichter. Nur haben wir hier an Stelle der Leiterspannung die Spannung des geladenen Kondensators C. Nachdem kein Strom mehr über Th1 fließt, erscheint die Kondensatorspannung als negative Sperrspannung an Th1. Dadurch wird es möglich, die nötige Freiwerdezeit erheblich zu verkürzen. Der Kondensator wird bis zum Zeitpunkt t_4 über den Verbraucher und die Batterie durch den Strom i_2 völlig umgeladen. Der von der Induktivität des Verbrauchers getriebene Strom wechselt von Th2 auf die Freilaufdiode D_f über. Sind beide Thyristoren gezündet, so setzt sich der Verbraucher- oder Laststrom aus den Teilströmen i_1 (über Th1) und i_2 (über Th2) zusammen. Der Strom i_{Df} über die Freilaufdiode entspricht der offenen Schalterstellung von S (Bild 7.14). Wird Th1 erneut gezündet, so fließt über

diesen nicht nur der Verbraucherstrom, auch C lädt sich wieder um, und damit ist die Löscheinrichtung wieder betriebsbereit. Die Thyristoren im Gleichstromsteller werden unmittelbar nach dem Zünden sehr hart beansprucht. Der Durchlaßstrom steigt steil auf seinen Endwert an. Beim Zünden von Th1 und Th2 treten große di/dt-Werte auf. Die Taktfrequenz des Gleichstromstellers richtet sich nach der Zeitkonstante des Verbrauchers. Bei Feldspeisung von Generatoren kann sie z. B. klein sein (50 Hz), während sie bei der Ankerspeisung von Motoren hoch sein muß (bis ungefähr 1000 Hz). Mit erweiterten Gleichstromstellern ist es möglich, die abgebauteFeldenergie in die Gleichstromquelle zurückzuspeisen. Praktische Bedeutung hat das bei der Nutzbremsung von Fahrmotoren.
Das Hauptanwendungsgebiet des Gleichstromstellers ergibt sich aus der Möglichkeit, Gleichstromantriebe aller Art aus Gleichspannungsquellen fester Spannung verlustarm steuern zu können. So werden die Gleichstromsteller bei Batteriefahrzeugen (Nutzbremsung), zur Erregung von Steuergeneratoren bei dieselelektrischen Fahrzeugs- oder Schiffsantrieben (bei Fehlen eines Drehstromnetzes) usw. benutzt. Am Schluß sei noch etwas zu den Taktgebern gesagt. Als Taktgeber kommen Schwingungsschaltungen einfachster Art in Frage. Die Steuerimpulse können direkt für Haupt- und Hilfsthyristor abgegriffen werden. Die Steuerimpulse für den Löschthyristor müssen allerdings in ihrer Lage zeitlich einstellbar sein.

7.4. Anwendung von Thyristoren in Wechselstromkreisen

7.4.1. Stromrichterschaltung

Mit Stromrichtern wird die Energie des Wechselstromnetzes in Gleichstromenergie umgeformt. Weiterhin kann der Stromrichter in der Regelungstechnik auf Grund seiner Verstärkereigenschaften eingesetzt werden. Stromrichter am Wechselstromnetz einschließlich Drehstromnetz werden als netzgeführte Stromrichter bezeichnet. Ein netzgeführter Strom-

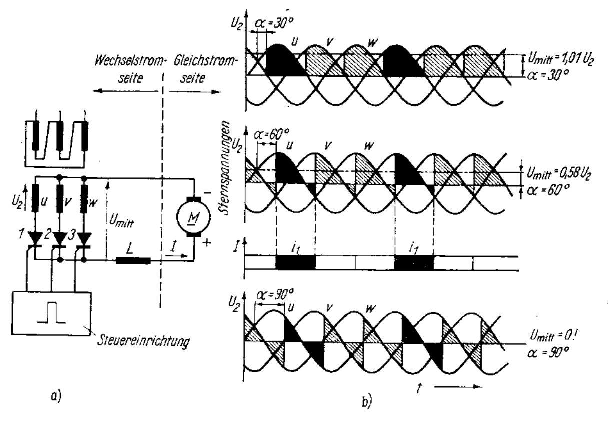


Bild 7.16 Stromrichter; a — Prinzip eines Stromrichters, b — Strom- und Spannungsverhältnisse (dunkel gezeichnete Flächen gelten für gezündeten Thyristor 1)

richter, der aus einem Wechselstromnetz die Energie für einen Gleichstromverbraucher umformen soll, besteht im wesentlichen aus einem Ventilsatz, einem Steuersatz, einem Transformator (in den meisten Fällen) und einer Glättungseinrichtung (Drossel) im Gleichstromkreis. Der Ventilsatz enthält dabei Thyristoren in den verschiedensten Schaltkombinationen. Im Steuersatz werden mit Transistorschaltungen Steuerimpulse erzeugt, deren Lage gegenüber der Netzspannung zeitlich verändert werden kann. In Bild 7.16a ist das Prinzip einer netzgeführten Stromrichterschaltung dargestellt. Wir unterscheiden dabei eine Gleichstromseite und eine Wechselstromseite. Wie bereits angedeutet, kann man die zeitliche Lage der Zündimpulse verschieben und somit die Stromübernahme von einem Thyristor auf den nächstfolgenden verzögern. Ist der Steuerwinkel $\alpha = 0°$ (volle Aussteuerung!), so erhält man Verhältnisse, die einem Gleichrichterbetrieb mit einfachen, ungesteuerten Gleichrichtern entsprechen. Aus Bild 7.16b können wir entnehmen, daß mit größer werdendem Steuerwinkel der Mittelwert der Gleichspannung (U_{mitt}) kleiner wird. Mit Thyristoren ist es also möglich, die Spannung verlustlos her-

unterzusteuern. Wenn wir Bild 7.16b betrachten, sehen wir, daß bei einem Steuerwinkel von ungefähr 60° auch während der Zeitabschnitte negativer Augenblickswerte der *Sternspannung* ein positiver Strom fließt. Dies wird durch die Glättungsdrossel hervorgerufen. Bekanntlich versucht ja nach der *Lenzschen Regel* eine Induktivität bei Änderung des Stromflusses den alten Zustand aufrechtzuerhalten. Die Induktivität ist also in gewissem Sinne ein Energiespeicher. Die dazu notwendigen geringen Stromänderungen di/dt sind in Bild 7.16b nicht angedeutet.
Die Belastung des Thyristors, d. h. also die Höhe des Stromes, wird durch den Lastkreis bestimmt. Man kann z. B. mit dieser Einrichtung die Drehzahl von Gleichstrommotoren regeln. Nehmen wir einen fremderregten Gleichstrommotor, dann ist bis in den Bereich kleiner Spannungen der Motorstrom dem Drehmoment proportional. Damit bleibt auch der Motorstrom bis hinunter zu kleinen Spannungen bei konstanter Belastung konstant. Die Drehzahl eines Gleichstrommotors dagegen ist proportional der Spannung. Wie schon erklärt, läßt sich durch Veränderung des Steuerwinkels die Höhe der Spannung verändern. Das bedeutet, daß wir durch Veränderung des Steuerwinkels in der Lage sind, die Drehzahl eines Gleichstrommotors zu regeln. Allerdings kann in der Praxis der Steuerwinkel nie gleich 90° werden. Bei diesem Winkel können wir aus Bild 7.16b entnehmen, daß dann die Spannung $U_{mitt} = 0$ ist. Wir wissen aber, daß für den stationären Betrieb des Thyristors immer ein ganz bestimmter Durchlaßstrom und damit auch eine Mindestspannung vorhanden sein muß. Die Mindestspannung ist außerdem für den Spannungsabfall im Verbraucher notwendig. Der Thyristor hat ja bekanntlich die Eigenschaft, in beiden Richtungen den Strom zu sperren. Während in negativer Sperrichtung die maximale Sperrbeanspruchung der der ungesteuerten Thyristoren entspricht, wächst in positiver Richtung die Sperrbelastung mit größer werdendem Steuerwinkel. Allerdings wird der Wert der größten auftretenden negativen Sperrspannung nicht überschritten. Somit muß also der Thyristor in beiden Richtungen die gleiche Sperrfähigkeit haben.

Um nun über Stromrichter betriebene Gleichstromantriebe in der Drehrichtung umkehren zu können, bedient man sich verschiedener Möglichkeiten. Die einfachste Lösung ist die Anwendung eines entsprechenden Schalters. Mit diesem Schalter wird dann entweder das Ankerfeld oder das Erregerfeld umgeschaltet. Diese Art ist allerdings für Betriebsarten, die ein häufiges und schnelles Umschalten erfordern, unbrauchbar. Man hat deshalb Umkehrstromrichter entwickelt. Es handelt sich dabei um eine Zusammenschaltung von 2 Stromrichtern für entgegengesetzte Stromrichtung. Für die Umkehrstromrichter wiederum gibt es die verschiedensten Schaltungsmöglichkeiten, die aber hier nicht weiter erläutert werden sollen.

7.4.2. Netzgeführte Wechselrichter

Wechselrichter sind praktisch die Umkehrung der Stromrichter, oder, mit anderen Worten, Gleichstromenergie soll mittels Wechselrichters in Wechselstromenergie umgewandelt werden. Dabei muß die Gleichstromquelle (Akkumulator, Gleichstromgenerator) so angeschlossen sein, daß durch die Thyristoren in Durchlaßrichtung ein Strom fließen kann. Auch

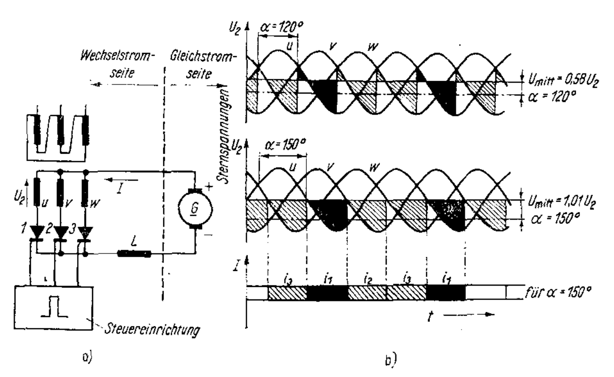


Bild 7.17 Wechselrichter; a — Prinzip des Wechselrichters, b — Strom- und Spannungsverhältnisse (dunkel gezeichnete Flächen gelten für gezündeten Thyristor 1)

hier haben wir wieder eine Gleich- und eine Wechselstromseite. Bild 7.17 zeigt das Prinzip einer Wechselrichterschaltung und das Verhalten der Spannung bei verschiedenen Steuerwinkeln. Die EMK der Gleichstromquelle muß nicht nur die Spannung U_{mitt} liefern, sondern darüber hinaus noch die Durchlaßspannung für die stromführenden Thyristoren. Die Thyristoren auf der Wechselstromseite werden so angesteuert ($\alpha > 90°$), daß sich ein negativer Mittelwert der Spannung einstellt. Wir wollen uns nun vorstellen, daß die dargestellte linke Schaltungshälfte einschließlich der Glättungsdrossel wie eine Batterie mit der Gegenspannung U_{mitt} wirkt, in die vom Generator her Energie geliefert wird. Durch Veränderung des Steuerwinkels ($\alpha > 90°$) kann man nun die Höhe dieser Gegenspannung einstellen. Steuerwinkel und Gegenspannung verhalten sich proportional, d. h., mit Vergrößerung des Steuerwinkels wächst auch die Gegenspannung.

Bei Elektrofahrzeugen stellt man oft die Forderung, die z. B. bei längeren Talfahrten entstehende Bremsenergie sinnvoll umzuwandeln, um sie dann nutzbringend weiterverwenden zu können. Die Bremsenergie wird deshalb derart umgewandelt, daß sie gleich in das Netz zurückgespeist werden kann (Nutzbremsung!). Kommen wir zu unserem Wechselrichter zurück. Ein Fahrmotor würde also zunächst in Gleichrichterschaltung betrieben werden (Steuerwinkel $\alpha = 0°$). Bei einsetzender Bremsung müßte die Anker- oder die Erregerwicklung umgepolt werden. Die jetzt als Generator wirkende Maschine liefert nun im Wechselrichterbetrieb Energie zurück ins Netz. Wie geht nun der Übergang vom Wechselrichter- in den Gleichrichterbetrieb vor sich? Betrachten wir noch einmal die Bilder 7.15b und 7.16b. Zunächst geht man von einem Steuerwinkel $\alpha > 90°$ aus. (Die Ausgangsspannung ergibt sich aus der Differenz der Flächen über und unter der Nullinie.) Der Übergang vom Wechselrichter- in den Gleichrichterbetrieb erfolgt dann durch ständiges Verkleinern des Steuerwinkels. Wenn an Stelle der Last eine Spannungsquelle tritt, wird die Energierichtung umgekehrt. Aus der Spannungsquelle wird Energie ins Netz zurückgeliefert, und wir haben es somit mit einem netzgeführten Wechselrichter zu tun.

7.4.3. Wechselstrom- und Drehstromsteller

Unter einem Wechselstromsteller versteht man prinzipiell ein Paar in Gegenparallelschaltung betriebener Thyristoren in der Zuleitung eines Wechselstromverbrauchers. Über netzsynchrone Steuerimpulse auf die Steuerelektroden der Thyristoren läßt sich die Verbraucherspannung zwischen 0 und dem vollen Wert steuern. Eine Zusammenschaltung mehrerer Wechselstromsteller in Drehstromkreisen nennt man entsprechend Drehstromsteller. Bild 7.18 zeigt das Prinzip eines Wechselstromstellers. Die Thyristoren werden über eine Impulsformerstufe gezündet. Entsprechend der Größe des Steuerwinkels α kann die Effektivspannung stufenlos bis zum Wert 0 verändert werden. Beim Einschalten von an Wechselstromstellern angeschlossenen Anlagen können hohe du/dt-Werte auftreten. Mit einer R-C-Schutzbeschaltung können diese zu hohen Werte vermieden werden. In Bild 7.18 ist das durch R1 und C1 angedeutet.

Nach /1/ darf der Laststrom $2 \cdot I_{nenn} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ betragen.

(I_{nenn} = zugelassener arithmetischer Strommittelwert der verwendeten Thyristoren.) Dies ist besonders bei Helligkeits-

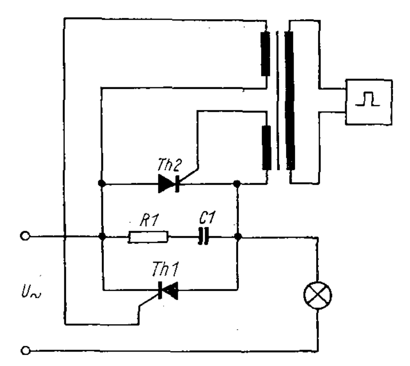
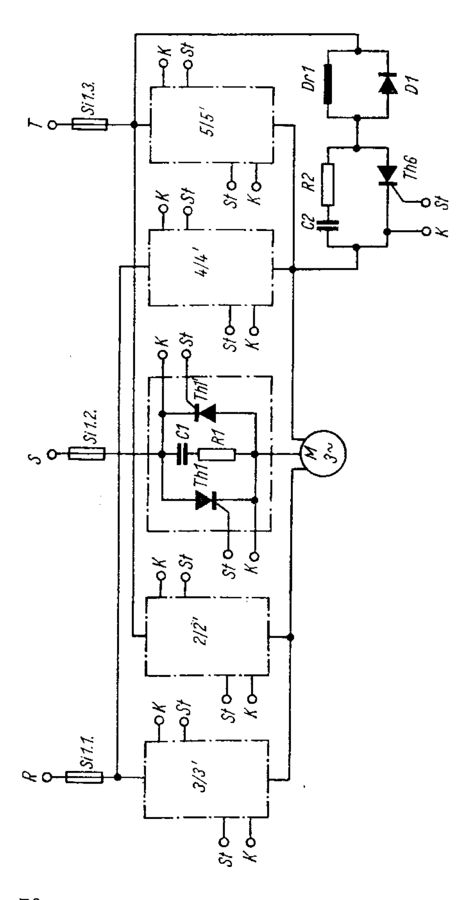


Bild 7.18 Prinzip des Wechselstromstellers

steuerungen von Beleuchtungsanlagen mit Glühlampen zu beachten. Bekanntlich ist ja der Kaltwiderstand einer Glühlampe wesentlich kleiner als ihr Warmwiderstand ($R_{kalt} \approx 0{,}1 \cdot R_{warm}$); d. h. also, im Einschaltmoment fließt zunächst ein ziemlich großer Strom, bis die Glühlampen ihren Warmwiderstand erreicht haben. Es besteht damit die Gefahr, daß die Thyristoren überlastet und damit zerstört werden. Man hat diesbezüglich Schaltungen entwickelt, die diese Gefahr beseitigen helfen. So werden z. B. mit den Kontakten eines Hilfsschützes die Thyristoren bis zum Erreichen des Warmwiderstands der Glühlampen überbrückt. Danach können die Thyristoren den vollen Laststrom übernehmen. Werden Lampen über Transformatoren (z. B. Leuchtstofflampen) angeschlossen, so ist auf genau symmetrisch liegende Steuerimpulse zu achten. Anderenfalls kann ein Flimmern der Lampen auftreten. Diese symmetrischen Steuerimpulse kann man mittels einer Steuereinrichtung, die mit doppelter Netzfrequenz arbeitet, erreichen. Es werden dabei die Steuerimpulse immer abwechselnd auf die Steuerelektroden der Thyristoren gegeben.
Wird ein Wechselstromsteller nur in den Extremfällen, also voll ausgesteuert bzw. gesperrt, betrieben, so handelt es sich um einen kontaktlosen Schalter. Der Vorteil eines solchen Schalters ist, daß er keinem Verschleiß unterworfen ist. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, daß auf Grund des Sperrwiderstands der Thyristortablette keine Potentialtrennung vorhanden ist. Dies ist besonders bei irgendwelchen Reparaturen zu beachten!
Die Anwendungsmöglichkeiten des Wechselstromstellers sind sehr vielseitig. Wie bereits angedeutet, wird der Wechselstromsteller sehr häufig in Beleuchtungsanlagen zur Helligkeitssteuerung verwendet. Aber auch für Scheinwerfersteuerungen, Heizungssteuerungen sowie für die verschiedenartigsten Fernsteuerungen von Wechselstromverbrauchern ergibt sich ein weites Anwendungsfeld.

7.4.4. Schnelle Schalter in Wechselstromkreisen

Mit Thyristoren ist es möglich, kontaktlose Schalter mit kurzen Schaltzeiten und hohen Schaltfrequenzen zu verwirklichen. Die kurzen Schaltzeiten sind in erster Linie von der Freiwerdezeit des Thyristors abhängig. Besonders im Werkzeugmaschinenbau ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten.



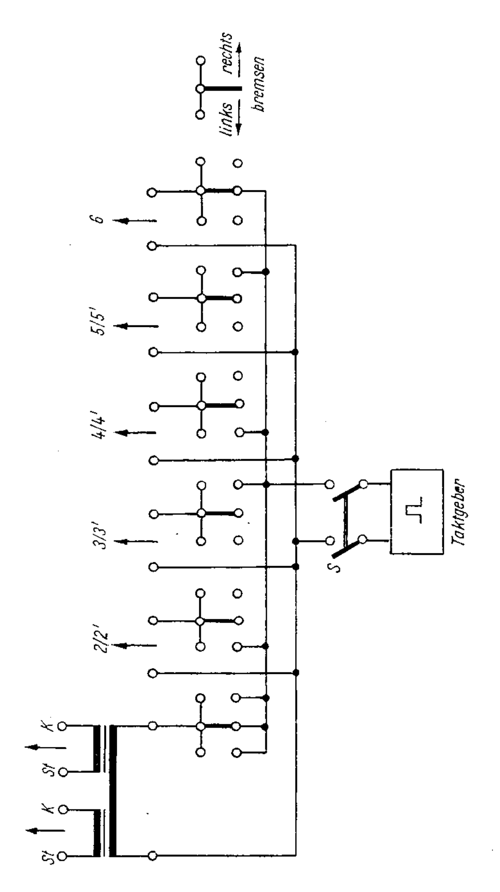


Bild 7.19 Schaltung zur kontaktlosen Drehrichtungsumkehr und zur Gleichstrombremsung eines Synchronmotors ((2 Teilzeichnungen))

Sollen die schnellen Schalter nur zum Ein- und Ausschalten benutzt werden, so ergibt sich ein relativ einfacher Aufbau der Schaltung. Zur Erzeugung der Steuerimpulse werden Impulsgeber mit einer Folgefrequenz von ungefähr 2 kHz und einer Impulsbreite von etwa 100 μs verwendet. Die Steuerim-

pulse werden über Impulsübertrager auf die Steuerelektroden der Thyristoren gegeben. Die Ausgangsleistung eines solchen Impulsgebers beträgt in der Regel 10 W. Mit dem Einschalten des Impulsgebers werden Steuerimpulse erzeugt und auf die Steuerstrecke des Thyristors gegeben. Gleichzeitig wird damit der jeweilige Antrieb eingeschaltet. Ausgeschaltet wird ganz einfach, indem der Impulsgeber ausgeschaltet wird, selbstverständlich mechanisch oder elektronisch.
Wir wollen uns nun einem Schaltungsbeispiel zuwenden, wie es annähernd in der Praxis vorkommen kann. In Bild 7.19 ist eine Schaltung zur kontaktlosen Drehrichtungsumkehr und zur Gleichstrombremsung eines Synchronmotors mit Thyristoren dargestellt. Vor einer Drehrichtungsumkehr erfolgt eine Abbremsung mit Gleichstrom. Der Einfachheit wegen ist nur ein Thyristorpaar mit R-C-Glied dargestellt. In den anderen angedeuteten Kästchen befinden sich die gleichen Bauelemente. Betrachten wir nun die Schaltung im Zusammenhang mit den einzelnen Drehrichtungen.
Für beide Drehrichtungen, also Rechts- oder Linkslauf, sind die Thyristoren Th1 und Th1′ stromführend. Soll der Motor im Linkslauf betrieben werden, so müssen die Thyristoren Th2, Th2′, Th4 und Th4′ gezündet werden. Entsprechend müssen dann für den Rechtslauf Th3, Th3′, Th5 und Th5′ stromführend sein. Soll ein Drehrichtungswechsel vorgenommen werden, so erfolgt eine Umschaltung über eine Zwischenstufe (Th1, Th1′ und Th6 gezündet!). Über die Drossel Dr1, den Thyristor Th6, eine Ständerwicklung des Motors und den Thyristor Th1′ fließt jetzt ein Halbwellengleichstrom, der den Motor stark abbremst. Je nach Dimensionierung von Dr1 wird die Höhe des Bremsstroms festgelegt. D1 ist die Freilaufdiode. Bei jedem Nulldurchgang der Netzspannung hat die Induktivität das Bestreben, den Strom aufrechtzuerhalten. Durch die Freilaufdiode kann der Strom so lange weiterfließen, bis die in der Induktivität gespeicherte Energie wieder verbraucht ist. Gezündet werden die Thyristoren mit Rechteckimpulsen. Die Impulsfolgefrequenz beträgt dabei 2 kHz und die Impulsbreite 100 μs. Die Impulse selbst werden über getrennte Wicklungen der jeweiligen Übertrager auf die einzelnen Steuerelektroden

der Thyristoren gegeben. Damit elektrische Unfälle vermieden werden, muß der Motor sicher vom Netz getrennt werden können. Es ist ja bekannt, daß auch bei einem nicht gezündeten an Spannung liegenden Thyristor ein gewisser Strom fließt. Außerdem liegen auch die Phasenanschlüsse über die R-C-Kombination an Spannung. Es muß deshalb überall da, wo Thyristoren als Schalter benutzt werden, mit einem Hauptschalter der gesamte Antrieb bzw. Verbraucher sicher vom Netz getrennt werden können. Der in Bild 7.19 dargestellte Schalter mit 6 Schaltebenen kann selbstverständlich auch mittels elektronischer Schalter realisiert werden. Dabei ist allerdings zu beachten, daß die Thyristoren Th2, Th2′, Th4 und Th4′ gegen die Thyristoren Th3, Th3′, Th5 und Th5′ sicher verriegelt werden.

7.5. Umrichter

Wir wollen uns nun einem letzten Anwendungsgebiet der Thyristoren zuwenden, den Umrichtern. Was ist ein Umrichter? Unter einem Umrichter versteht man eine elektronische Einrichtung, die direkt oder auch indirekt aus einem vorhandenen Wechselstromsystem beliebiger Phasenzahl, Frequenz und Spannung ein neues System bildet, das eine andere Phasenzahl, Frequenz und Spannung haben kann. Sie lassen sich stets auf Gleichstromsteller, selbst- oder netzgeführte Stromrichter in verschiedenen Kombinationen zurückführen.

7.5.1. Direkte Umrichter

Der in Bild 7.20 dargestellte direkte Drehstrom-Einphasenumrichter besteht aus 2 netzgeführten Stromrichtern, die über netzsynchronisierte Steuereinheiten so gesteuert werden, daß im Lastkreis ein Wechselstrom erzwungen wird, vorausgesetzt allerdings, daß Frequenz f_2 kleiner ist als Frequenz f_1. Man steuert den Umrichter so, daß die Einphasenspannung trapezförmig verläuft. Dadurch erreicht man einen hohen Effektiv-

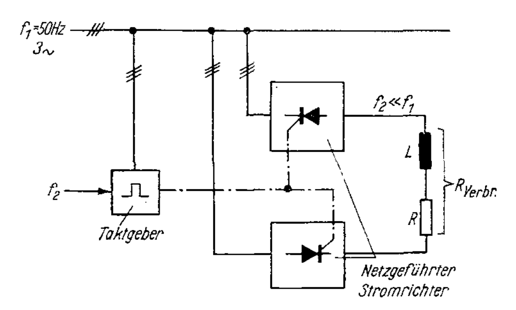


Bild 7.20 Prinzip des direkten Umrichters

wert des Einphasenstroms. Ein besonderes Merkmal des direkten Umrichters ist, daß er sich bezüglich der Kommutierung wie ein netzgeführter Stromrichter verhält. Die Kommutierungsleistung wird dabei aus dem Netz bezogen.

7.5.2. Indirekte Umrichter

Der indirekte Umrichter ist durch einen immer vorhandenen Gleichstromzwischenkreis gekennzeichnet. Die Energie wird dadurch 2mal umgeformt. Man erreicht nach der ersten Umformung in Gleichstrom mit einer Glättungseinrichtung eine weitgehende Entkopplung der beiden Wechselstromkreise. Dadurch wird es möglich, am Ausgang des Umrichters höhere Frequenzen als 50 Hz zu entnehmen. Die Frequenzgrenze ist durch die Freiwerdezeit der Thyristoren gegeben. Bild 7.21 zeigt den schematischen Aufbau eines indirekten Umrichters. Der einfachste Fall eines indirekten Umrichters liegt im Läuferkreis einer untersynchronen Stromrichterkaskade vor. Hier wird zunächst die Schlupfenergie der Induktionsmaschine über einen ungesteuerten Gleichrichter in Gleichstrom umgewandelt. Da der Läufer die Eigenschaft eines Netzes mit veränderlicher Spannung und veränderlicher Frequenz hat, kann man von einem netzgeführten Betrieb sprechen. Dieses *Netz* kann auch die Kommutierungsblindleistung für den Gleichrichter liefern. Der gewonnene Gleichstrom wird über einen netzgeführten

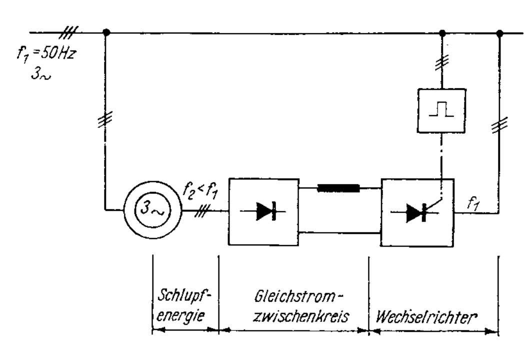


Bild 7.21 Indirekter Umrichter

Stromrichter (Wechselrichter) dem Netz zurückgeliefert. Die weitere Umformung erfolgt dann durch einen Wechselrichter. Über den Steuerwinkel des Wechselrichters kann die Drehzahl der Maschine ohne wesentliche Verluste stetig verändert werden.

Soll ein Blindleistungsverbraucher (z. B. Induktionsmaschine) beim Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis gespeist werden, so ist ein selbstgeführter Stromrichter erforderlich. Bild 7.21 muß dann so verändert werden, daß an die Stelle des netzgeführten Stromrichters ein selbstgeführter Stromrichter tritt. Dabei ist es möglich, daß der Gleichstrom des Zwischenkreises und die Frequenz des selbstgeführten Stromrichters einander beliebig zugeordnet werden. Die Maschine kann somit bei sehr kleinen Frequenzen (einschließlich 0!) mit vollem Drehmoment belastet werden. Aber auch mit hoher Frequenz kann die Maschine betrieben werden. Begrenzt wird die Frequenz wiederum durch die Freiwerdezeit der Thyristoren.

Mit den Ausführungen über die Umrichter wollen wir die prinzipiellen Betrachtungen über die Anwendungsmöglichkeiten des Thyristors in Gleich- und Wechselstromkreisen abschließen. Im letzten Kapitel dieses Büchleins werden noch einige Beispiele aus den verschiedensten Anwendungsbereichen für einen eventuellen Nachbau beschrieben.

8. Überprüfungen und Messungen an Thyristoren

In diesem Abschnitt wollen wir uns einem bei praktischen Arbeiten mit Thyristoren auftretenden Problem, den Überprüfungen von Thyristoren bzw. Messungen an Thyristoren, zuwenden. Grundsätzlich unterscheiden wir dabei die Überprüfung der Funktionstüchtigkeit und die Kennwert- bzw. Kennlinienmessung.
Um die Funktionstüchtigkeit eines Thyristors zu überprüfen, kontrolliert man diesen im einfachsten Fall mit einem Gleichstromdurchgangsprüfer auf Durchlegierungs- und Kontaktfehler. Sehr günstig ist bei Messungen an Thyristoren die Anwendung eines Oszillografen. Es lassen sich dadurch bereits Kennlinienbetrachtungen durchführen. Aber nicht nur die statischen Werte interessieren für den richtigen Einsatz eines Thyristors in einer Schaltung, sondern auch die dynamischen Werte. Zu diesen dynamischen Überprüfungen bzw. Messungen gehören u. a. die Ermittlung der zulässigen Spannungssteilheit und der Freiwerdezeit.
Um nun die Messungen unter möglichst betriebsnahen Bedingungen durchführen zu können, ist es erforderlich, diese Messungen nicht nur bei normalen Raumtemperaturen durchzuführen, sondern bei höchstzulässiger Tablettentemperatur. Es wurde ja oft in diesen Ausführungen auf die starke thermische Abhängigkeit der einzelnen Kenndaten des Thyristors hingewiesen. Damit der zu messende Thyristor entsprechend erwärmt werden kann, schraubt man ihn auf eine Kupferplatte und erhitzt diese mit einem Heizkörper (z. B. Drahtwiderstand). Die Temperatur muß nun mit einem Kontaktthermometer so eingestellt werden, daß die Bodentemperatur des zu überprüfenden Bauelements die gewünschte Tablettentemperatur erreicht. Bei der Messung ist dann allerdings darauf zu achten, daß keine wesentliche Erhöhung der Temperatur eintreten kann.

8.1. Gleichstrommäßige Durchgangsprüfung

Am einfachsten kann ein Thyristor mit einem Gleichspannungsdurchgangsprüfer geprüft werden. Geeignet hierfür ist beispielsweise der Vielfachmesser III. Allerdings muß gesagt werden, daß mit dieser Methode nur grobe Durchlegierungsfehler oder Kontaktunterbrechungen festgestellt werden können. Ursache dafür sind die in Reihe liegenden p-n-Übergänge (s. Bild 2.1!), von denen stets 1 in Sperrichtung gepolt ist. Die Steuerstrecke wird genau wie eine einfache Diode auf Durchgang bzw. Sperrung überprüft. Ist der Thyristor in einem einwandfreien Zustand, dann muß der Durchgangsprüfer für die beiden Durchlaßrichtungen des Thyristors einen sehr großen Widerstand anzeigen. Einen Nachteil dieser Meßmethode darf man dabei nicht übersehen. Unterbrechungen im Inneren des Thyristors werden hierbei nicht angezeigt. Um einzelne Punkte von Kennlinien des Thyristors messen zu können, bedient man sich der Gleichstrommeßkreise. In Bild 8.1 ist ein einfacher Gleichstrommeßkreis zur Bestimmung der Blockier- und Sperrspannungen dargestellt. Die Spannungsquelle soll in den Grenzen von 0 bis ungefähr 1500 V veränderlich sein, bei einem Sperrstrom von maximal 75 mA. Der Innenwiderstand der Spannungsquelle ist so zu wählen, daß bei einem Kurzschluß der Ausgangsstrom auf 75 mA begrenzt wird. Das ist deshalb erforderlich, damit besonders hochsperrende Thyristoren beim Zünden über die Katoden-Anoden-Strecke nicht gefährdet werden. Werden Glättungskondensatoren verwendet, so sollten diese ohne einen begrenzenden

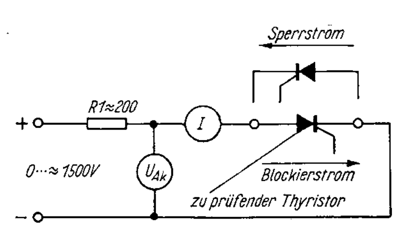


Bild 8.1 Schaltung zur Bestimmung der Blockier- und Sperreigenschaften

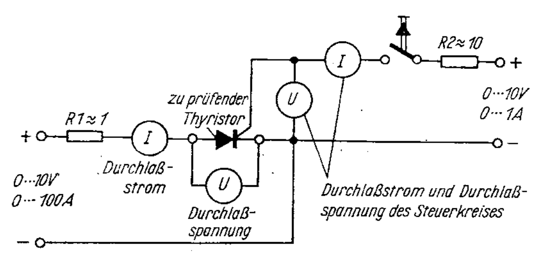


Bild 8.2 Schaltung zur Bestimmung der Durchlaßspannung

Schutzwiderstand nie unmittelbar an die Thyristoren angeschlossen werden.
Die Durchlaßspannung wird nach Bild 8.2 bestimmt. Hierbei wird eine Gleichstromquelle mit kleiner Ausgangsspannung und großer Strombelastbarkeit verwendet. Damit überhaupt ein Durchlaßstrom fließen kann, benötigen wir noch eine Zündeinrichtung. Bei dieser Messung darf auf keinen Fall die Kühlung des Thyristors vernachlässigt werden.
Zur Messung der Steuerkreis- und Zündeigenschaften kann man ebenfalls die in Bild 8.2 dargestellte Schaltung benutzen. Nur muß man dann die Daten der Gleichstromquelle etwas verändern. Es muß eine Spannung bis zu 10 V bei einem Strom bis zu 1 A zur Verfügung stehen. Bei entsprechendem Anschluß des Thyristors kann mit dieser Gleichstromquelle die Sperr- und die Durchlaßkennlinie des Steuerkreises aufgenommen werden. Für die Prüfung der Zündeigenschaften wird an die Katoden-Anoden-Strecke eine veränderliche Gleichspannung gelegt, die auf die erforderliche Größe der Katoden-Anoden-Spannung im Zündpunkt, z. B. 2 V, eingestellt wird. Zu beachten ist, daß der Innenwiderstand der Gleichstromquelle so klein ist, daß nach dem Zünden im Lastkreis ein Strom von etwa 10 A fließen kann.

8.2. Messung des Haltestroms, der Spannungssteilheit und der Freiwerdezeit

Der Haltestrom eines Thyristors ist für die praktische Schaltungstechnik sehr wichtig. Wir wissen, daß der Haltestrom ein Stromgrenzwert ist, bei dessen Unterschreitung der Thyristor vom Durchlaßzustand in den Blockierungszustand übergeht. Der genaue Punkt dieses Übergangs wird durch den Lastwiderstand bestimmt. Der Haltestrom wird nach der in Bild 8.3 gezeigten Schaltung gemessen. Man zündet den Thyristor, indem man die Drucktaste T kurzzeitig drückt. Bei konstantem Lastwiderstand R_L (der praktischen Belastung entsprechend) wird dann die Spannung so weit verringert, bis der Thyristor sprungartig vom leitenden in den gesperrten Zustand übergeht.
Zur Messung der Spannungssteilheit, auch Spannungsanstiegsgeschwindigkeit du/dt genannt, benötigen wir einen Katodenstrahl-Oszillografen. Der notwendige Schaltungsaufbau ist in Bild 8.4 dargestellt. Legen wir nun an den Eingang der Schaltung eine Wechselspannung, so wird der am Eingang der Schaltung liegende Kondensator C1 während einer Halbwelle der Wechselspannung auf den Wert

$$U = \sqrt{2} \cdot U_{eff} = U_{C1}$$

aufgeladen. Bei der nächsten Halbwelle wird der Hilfsthyristor gezündet und damit gleichzeitig die Spannung von C1 auf einen nachgeschalteten Schwingkreis gegeben. Am Kon-

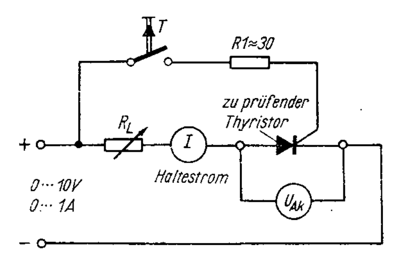


Bild 8.3 Schaltung zur Bestimmung des Haltestroms

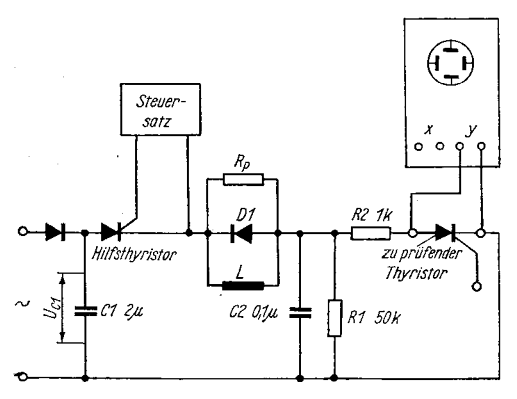


Bild 8.4 Schaltung zur Messung der Spannungssteilheit

densator C2 steigt nun die Spannung ungefähr linear an. Dieser Vorgang endet, wenn die Spannung den Wert erreicht hat, der zuvor an C1 vorhanden gewesen ist. Jetzt wird auch die parallel zum R-L-Kreis geschaltete Diode leitend. Ihre Aufgabe ist es, die am zu prüfenden Thyristor liegende Spannung auf die an C1 liegende Spannungshöhe zu begrenzen. Der zu prüfende Thyristor ist über einen Schutzwiderstand von 1 kΩ an den Kondensator C2 angeschlossen. Zur Dimensionierung des Kreises kann folgende Beziehung verwendet werden:

$$\frac{\sqrt{L/C_2}}{R_p} = \frac{3}{4}.$$

Die Anfangssteilheit läßt sich mit der Gleichung

$$\frac{du}{dt} = \frac{U_{C1}}{R_p \cdot C_2}$$

bestimmen. Mit einem nach Bild 8.4 angeschlossenen Oszillografen läßt sich die Spannung am zu prüfenden Thyristor als Funktion der Zeit beim Messen der du/dt-Werte abbilden. Sollte die Spannungsanstiegsgeschwindigkeit zum Zünden des Prüfthyristors nicht ausreichend sein, dann entlädt sich C2 über den parallelgeschalteten Widerstand von 50 kΩ. Der An-

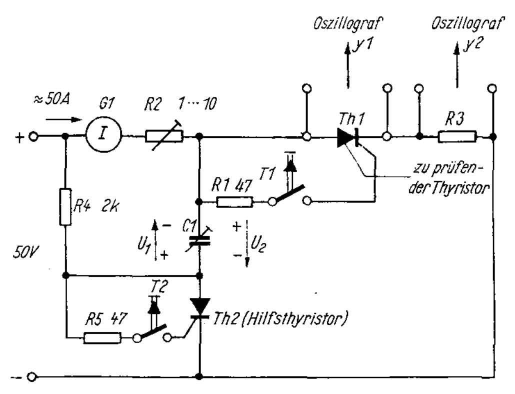


Bild 8.5 Schaltung zur Messung der Freiwerdezeit

fangszustand ist dann nach ungefähr 15 ms wiederhergestellt. Die Messung der Freiwerdezeit soll mit der in Bild 8.5 abgebildeten Schaltung durchgeführt werden. Der zu prüfende Thyristor Th1 wird recht einfach durch Drücken des Drucktasters T1 gezündet. Nach dem Zünden von Th1 fließt über das Meßgerät T1 und den Widerstand R2 der Laststrom. Gleichzeitig wird über R4 der Kondensator C1 aufgeladen (U_1). Der in Bild 8.5 dargestellte untere Belag des Kondensators C1 wird positiv, der obere Belag negativ. Die Spannung am Kondensator beträgt im aufgeladenen Zustand 50 V. Wenn wir nun die Drucktaste T2 betätigen, wird der Thyristor Th2, auch Hilfsthyristor genannt, in den leitenden Zustand versetzt. Wir erreichen dadurch, daß sich C1 über Th2, R3 über Th1 entladen kann. Allerdings ist der von der Kondensatorspannung getriebene Strom dem Laststrom von Th1 entgegengerichtet. Haben wir C1 groß genug gewählt, so gelingt es uns, den zu prüfenden Thyristor auszuschalten. Mit der Sperrung von Th1 wird C1 erneut aufgeladen, doch diesmal in der entgegengesetzten Richtung. Die Umladung erfolgt über Th2. Ist der Kondensator vollständig auf $U_2 = 50$ V aufgeladen, so liegt diese Spannung als Blockierspannung an Th1. Die Größe von C1 muß nun durch Versuche so gewählt werden, daß gerade noch ein Ausschalten von Th1 möglich ist.

Wie läßt sich aber die Freiwerdezeit messen? Die Freiwerdezeit ist die Zeit, die zwischen dem Nulldurchgang des Laststroms und dem Nulldurchgang der wiederkehrenden Spannung vergeht. Um den Verlauf von Spannung und Laststrom gleichzeitig beobachten zu können, benötigt man einen Zweistrahloszillografen. Etwas umständlicher wird natürlich eine Messung ohne Zweistrahloszillografen (was in den meisten Fällen der Fall sein dürfte!). Dann müssen Strom und Spannung nacheinander gemessen werden. Wenn wir uns noch einmal Bild 4.3 anschauen, stellen wir fest, daß sich die Freiwerdezeit aus der Sperrverzögerungszeit und der Zeit, die zwischen dem Ansteigen der negativen Sperrspannung bis zum Nulldurchgang vergeht, zusammensetzt.
Auf einem Zweistrahloszillografen kann die Zeitdauer (Freiwerdezeit) zwischen dem Nulldurchgang des Thyristorstroms (y_2) und dem Nulldurchgang der Thyristorspannung (y_1) bestimmt werden. Allerdings muß für die Bestimmung des Nulldurchgangs vom Thyristorstrom ein induktiver Shunt (ungefähr 1 bis 10 mΩ) vorhanden sein (R3).
Wie unter 4.5.genannt, ist die Größe der Freiwerdezeit von verschiedenen Faktoren abhängig. Die Größe des Durchlaßstroms vor dem Ausschalten des Thyristors kann beispielsweise durch einen veränderlichen Widerstand R2 variiert werden. Die mittlere Stromsteilheit di/dt des abklingenden Durchlaßstroms von Th1 sollte 10 bis 20 A/μs nicht überschreiten. Diese Stromsteilheit ist eventuell durch geeignete Induktivitäten einzuregeln. Die maximale Spannung am Prüfthyristor in Rückwärtsrichtung kann durch eine unterschiedliche Aufladung von C1 eingestellt werden. Die Freiwerdezeit ist, wie schon mehrmals erwähnt worden ist, auch sehr temperaturabhängig. Eine konstant einstellbare Gehäusetemperatur wird, wie unter 8. kurz erläutert, durch Aufheizen des Prüfthyristorkühlkörpers erreicht.
Es ist aber auch ohne Oszillografen möglich, bei Kenntnis der Werte der Bauelemente und bei eingestelltem C1, nach /2/ die Freiwerdezeit t_f mit folgender Formel zu ermitteln:

$$t_f = 2\,\mu s + 1\,\Omega \cdot C \cdot \ln\left[1 + \cos\left(170^\circ : \sqrt{C}\right)\right];$$

t_f in μs, C in μF.

Die Genauigkeit der Berechnung wird mit ±10% angegeben. Ein Wort sei noch zur Stromquelle gesagt. Für eine möglichst genaue Messung ist es erforderlich, daß sowohl im unbelasteten als auch im belasteten Zustand von Th1 eine konstante Spannung $U_C = 50$ V zur Verfügung steht. Die Ausgangsspannung muß gut geglättet sein.

8.3. Aufnahme der Sperr- und der Blockierkennlinie und der Durchgangskennlinie

Kennlinien lassen sich einfach und zugleich zuverlässig mit einem Oszillografen aufnehmen. Zur Aufnahme der Sperr- und der Blockierkennlinie benutzen wir die Schaltung nach Bild 8.6. Es muß eine regelbare Spannungsquelle zur Verfügung stehen, mit der sich Spannungsscheitelwerte bis zu 1500 V erreichen lassen. Wir beginnen die Messung bei 0 V. Die Spannung ist kontinuierlich zu steigern. Wenn der Sperrstrom plötzlich stark ansteigt, ist die Durchbruchspannung nahezu erreicht. Den Durchbruch selbst sollte man aber auf jeden Fall vermeiden. Der 10-kΩ-Widerstand dient als Schutzwiderstand. Er soll eine Zerstörung des Thyristors beim Zünden durch Überschreiten der Nullkippspannung verhindern. Soll nur ein Ast

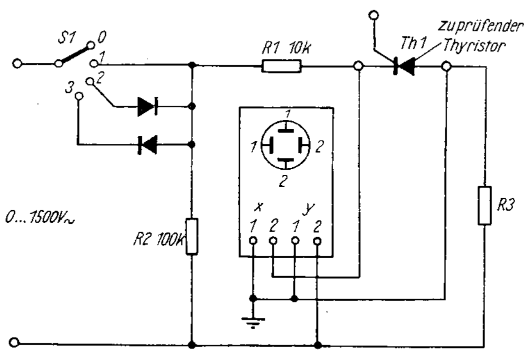


Bild 8.6 Schaltung zur Messung der Sperr- und der Blockierungskennlinie

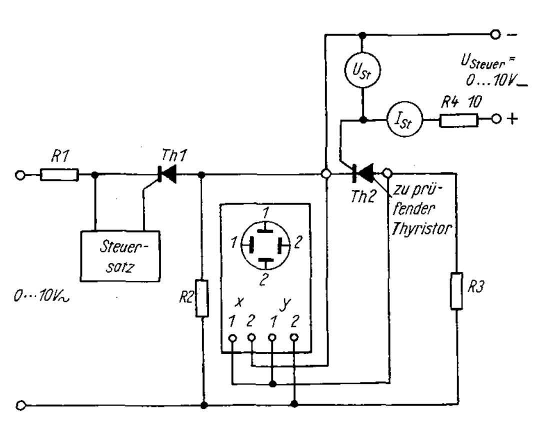


Bild 8.7 Schaltung zur Aufnahme der Durchlaßkennlinie

der Kennlinie aufgenommen werden, so ist je nach der Art der Kennlinie ein Gleichrichter von ausreichender Sperrfähigkeit über Schalter S1 in Reihe mit dem Netztransformator zu schalten.

Die Durchlaßkennlinie wird bei kleinem Schutzwiderstand und geringer Speisespannung nach Bild 8.7 aufgenommen. Die Zündung von Th1 erfolgt unmittelbar nach dem Nulldurchgang der Wechselspannung mit dem Steuersatz. Gleichzeitig kann man mit der Schaltung den Zündstrom in Abhängigkeit von der Katoden-Anoden-Spannung messen.

9. Wartung, Montage und Fehlerquellen

Thyristoren sind wie alle Halbleiterbauelemente wartungsfrei. Von Zeit zu Zeit sollte man allerdings die Thyristoren von Staub und anderen Verschmutzungen befreien. Besonders ist darauf bei den Isolationsstrecken zu achten. Je nach Einsatz der Thyristoren, z. B. bei Fahrzeugen treten mehr oder weniger starke Erschütterungen auf, sollte der feste Sitz überprüft werden. Ganz besonders wichtig ist das für Thyristoren, die auf bzw. in Kühlkörpern sitzen. Denn ein lockerer Sitz ergibt einen schlechten Wärmeübergang und damit natürlich auch eine schlechte Wärmeableitung über den Kühlkörper.
Für einen einwandfreien Betrieb der Thyristoren müssen einige Montagehinweise beachtet werden. Zunächst werden die kontaktgebenden Flächen vor dem Einschrauben in den Kühlkörper auf Sauberkeit (Oxidschicht, Staub, Farbe usw.) geprüft. Auch auf einen guten Zustand der Gewinde ist zu achten! Nachdem man sich überzeugt hat, daß alles in Ordnung ist, fettet man Kontakt- und Auflageflächen. Wegen eines guten Wärmeübergangs werden vorzugsweise Silikonfette verwendet. Durch das Fetten verhindert man eine mögliche elektrolytische Spannungskorrosion. Gleichzeitig wird durch das Fetten die Auswechselung beschädigter Bauelemente erleichtert. Bei einigen Thyristortypen muß vor dem Einschrauben in den Kühlkörper der Katodenanschluß entfernt werden, der dann nach dem Einschrauben des Thyristors wieder befestigt wird. Die Thyristoren müssen mit dem in den Datenblättern angegebenen Drehmoment festgeschraubt werden. Nur so ist ein guter und fester Sitz der Thyristoren gewährleistet. Denn beim Einschrauben der Thyristoren in die Kühlkörper gibt es keine zusätzlichen Maßnahmen, die ein Lösen der Schraubverbindung verhindern! Eventuell muß man einen Drehmomentenschlüssel benutzen. Besonders beim Aufsetzen des Steckschlüssels ist darauf zu achten, daß dieser genau senkrecht gehalten wird. Verkantet man den Schlüssel, so kann man unter

Umständen das Gehäuse beschädigen und damit den Thyristor unbrauchbar machen (Bruch, Undichtwerden des Gehäuses). Auch ist darauf zu achten, daß beim Einschrauben nicht die Steueranschlüsse beschädigt werden. Die flexiblen Katodenanschlüsse sind so anzuschließen, daß sie einerseits nicht zu straff (Zugkräfte auf Thyristorgehäuse!) und andererseits nicht zu locker (Kurzschluß- bzw. Erdschlußgefahr!) sind.
Nun soll noch von einigen typischen Störungen bei Thyristoren bzw. Thyristorschaltungen die Rede sein. Wie bei allen Halbleiterbauelementen müssen auch beim Thyristor die in den Datenblättern angegebenen Grenzwerte genau eingehalten werden. Eine sehr häufige Ausfallursache von Thyristoren ist eine zu hohe Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt. Man muß darauf achten, daß die Stromanstiegsgeschwindigkeiten laut Datenblatt nur bis auf einen festgelegten Stromscheitelwert zulässig sind und nur bei hohen sowie steilen Steuerimpulsen der Zündung ausgenutzt werden dürfen. Werden die zulässigen Werte überschritten, so muß der Thyristor nicht gleich ausfallen. Dies ist meistens dann erst der Fall, wenn die Nenntemperatur des Thyristors erreicht ist. Bekanntlich sinkt ja der zulässige di/dt-Wert mit zunehmender Temperatur. Bei induktiv belasteten Schaltungen (z. B. Gleichstromsteller) sind für die im Thyristor auftretenden di/dt-Werte allein die im Kommutierungskreis wirksam werdenden Induktivitäten verantwortlich (nicht die Lastinduktivitäten!). Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß z. B. bei einer induktiv belasteten Einphasenbrückenschaltung bei *lückendem* Strom (kleiner Stromflußwinkel) ein tadelloser Betrieb möglich ist. Vergrößert man den Stromflußwinkel, so treten bei wechselstromseitig zu kleinen Induktivitäten von der Lückgrenze an steile Stromanstiege auf, die dann zu Ausfällen der Thyristoren führen können.
Eine weitere, häufige Ursache des Ausfalls bzw. der Zerstörung von Thyristoren ist eine unzulässige hohe Spannungsbeanspruchung. Wird der laut Datenblatt angegebene Spitzenwert überschritten, so kann es zu einem unbeabsichtigten Zünden oder gar zur Zerstörung des Thyristors kommen. Eine häufige, besonders bei Schalthandlungen auftretende Ausfallursache

sind das ungewollte Zünden und die damit verbundene eventuelle Zerstörung des Halbleiterbauelements durch steil in Blockierungsrichtung ansteigende Spannungen. Da, wie bereits bekannt, das du/dt-Verhalten eines Thyristors stark temperaturabhängig ist, haben wir genau wie beim beschriebenen di/dt-Verhalten ebenfalls zunächst nach dem Einschalten einen einwandfreien Betrieb zu verzeichnen. Erst im Bereich der Nenntemperatur treten Störungen auf.
Werden Thyristoren durch Überströme unbrauchbar gemacht, so sind die jeweilige Schutzeinrichtung und deren richtige Dimensionierung zu überprüfen (Verwendung angepaßter Sicherungen!). Überspannungsbeschaltungen und Trägerstaueffekt-Beschaltungen mit Kondensatoren können auch steile Stromanstiege in den Thyristoren zur Folge haben. Sie liegen oft weit über den durch den Laststrom erzeugten Werten. Deshalb sind ebenfalls zu den häufigsten Zerstörungsursachen von Thyristoren falsch bemessene RC-Beschaltungen zu nennen. Eine ungedämpfte Entladung von Kondensatoren über Thyristoren ist unzulässig!
Außer an den Thyristoren selbst treten noch im Steuerkreis Fehler auf. Es kann sofort auf einen Fehler im Steuerkreis geschlossen werden, wenn sich z. B. bei geschlossenem Lastkreis und anliegender Spannung die Thyristorschaltung nicht in Betrieb setzen läßt. Als sehr zweckmäßig hat sich bei der Fehlersuche im Steuerkreis die Verwendung eines Oszillografen erwiesen. Zunächst ist zu untersuchen, ob die Steuereinrichtung überhaupt einwandfrei arbeitet. Dazu wird der Steueranschluß abgeklemmt. Fehlt bei angeklemmtem Steueranschluß die Zündspannung, so ist das mit allergrößter Wahrscheinlichkeit auf einen Kurzschluß der Steuerstrecke zurückzuführen. Wichtig sind weiterhin auch die richtige Höhe bzw. die richtige Zeitdauer der Zündimpulse. Am Ende des Zündvorgangs muß der Laststrom $\geqq$ Haltestrom sein. Anderenfalls bleibt der Thyristor nicht leitend. Dieser Sachverhalt ist besonders bei induktiven Lasten zu beachten, da ja beim Einschalten solcher Verbraucher der Laststrom nach einer e-Funktion langsam ansteigt. Bei Drehstrombrückenschaltungen kann es vorkommen, daß diese nicht gezündet werden. Die Ur-

sache hierfür ist in den meisten Fällen ein zu kurzer Zündimpuls (<60°). Die in Reihe liegenden Thyristoren werden dadurch nicht gleichzeitig gezündet, und damit ist auch keine Aussteuerung möglich. Sind die Zündimpulse zu hoch bzw. zu breit, so kann es zu einer Zerstörung der Thyristoren kommen. Dies ist dann der Fall, wenn die eben genannten Zündimpulse in den Bereich einer hohen negativen Sperrspannung geschoben werden. Die Gefahr wird um so größer, je weiter der Zündimpuls in die negative Sperrphase hineinreicht (je größer der Steuerwinkel α ist!).
Außer den hier genannten Montagehinweisen usw. gelten selbstverständlich für Thyristoren in der Regel auch alle weiteren allgemeinen Hinweise, wie wir sie von den anderen Halbleiterbauelementen her kennen.

10. Weiterentwicklungen des Thyristors

Die Weiterentwicklung des Thyristors geht in erster Linie zu immer höheren Durchlaßströmen und größerer Sperrfähigkeit hin. Mit der Vergrößerung des Durchlaßstroms wird zwangsläufig auch die Kristallfläche größer. Diese Tatsache ist, abgesehen von mechanischen Problemen, besonders unter dem Gesichtspunkt der Ausbreitungsgeschwindigkeiten zu betrachten. Bei der Herstellung des üblichen Thyristors zeichnen sich z. Z. 2 Wege ab. Es werden einmal Thyristoren für normale Starkstromnetze gefertigt, wobei hier großer Wert auf gute Sperrfähigkeit und gute Durchlaßeigenschaften gelegt wird. Zum anderen fertigt man Thyristoren zur Verwendung bei hohen Frequenzen. Bei diesen Thyristoren wird besonderer Wert auf die Freiwerdezeit sowie auf die zulässigen du/dt- und di/dt-Werte gelegt. Allerdings wird dieses bevorzugte Frequenzverhalten auf Kosten der Durchlaßeigenschaften erreicht. Außer dem hier beschriebenen „normalen" Thyristor soll noch kurz auf einige bemerkenswerte Weiterentwicklungen des Thyristors eingegangen werden.

10.1. Der Fotothyristor

Wie man bereits aus dem Namen schließen kann, ist der Fotothyristor ein Halbleiterbauelement, das sich durch Lichteffekte steuern läßt. Der Fotothyristor ist ein Vierschicht-Halbleiterbauelement. Der prinzipielle Aufbau eines Fotothyristors nebst Schaltbeispiel ist in Bild 10.1 dargestellt. Er unterscheidet sich von einem herkömmlichen Thyristor durch eine im Gehäuse befindliche Glaslinse und durch 2 herausgeführte Steuerelektroden (G_1 und G_2). Auch der Fotothyristor hat wie der gewöhnliche Thyristor ein ausgeprägtes Kippverhalten. Beim Fotothyristor haben wir nun verschiedene Zündmöglichkeiten. Er kann einmal durch einen Licht-

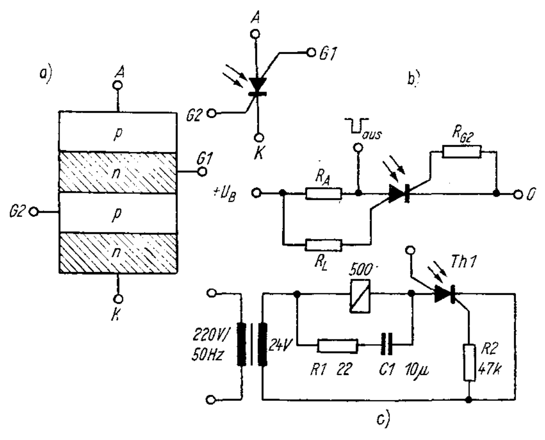


Bild 10.1 Fotothyristor; a — schematischer Aufbau und Symbol des Fotothyristors, b — prinzipielle Schaltung, c — Schaltbeispiel (Lichtrelais)

impuls gezündet werden, denn für diesen Zweck wurde er ja in erster Linie entwickelt, und weiterhin wie ein herkömmlicher Thyristor über die katodenseitige Steuerelektrode. Nach dem Zünden verhält sich der Fotothyristor ebenfalls wie der beschriebene Thyristor. Ausgeschaltet werden kann der Fotothyristor auf zweierlei Art. Das ist wie beim normalen Thyristor einmal durch Unterbrechung des Durchlaßstroms möglich, und weiterhin können wir den Fotothyristor abschalten, indem wir einen negativen Impuls auf die Anode geben. Hierbei liegt zwischen der Steuerelektrode G_1 und dem Anschluß für die positive Betriebsspannung der Lastwiderstand R_L. Der hochohmige Anodenwiderstand R_A sorgt für den erforderlichen Haltestrom (s. Bild 10.1b!). Es ist allerdings auch möglich, einen Fotothyristor mit offener Steuerelektrode G_1 zu betreiben. Der Widerstand an der Steuerelektrode G_2 bestimmt die Lichtempfindlichkeit des Fotothyristors. Die Abhängigkeit zwischen dem Widerstand und der Lichtempfindlichkeit ist linear. Wird z. B. dieser Widerstand um die Hälfte seines ursprünglichen Wertes verkleinert, so ist die doppelte

Lichtintensität als vorher zum sicheren Zünden des Thyristors erforderlich.
Wir unterscheiden beim Fotothyristor 2 hauptsächliche Betriebsarten: Betrieb mit Gleichspannung und Betrieb mit Wechselspannung. Bei Gleichspannungsbetrieb genügt ein kurzer Lichtimpuls zum Zünden des Thyristors. Wir haben hier auch einen gewissen Speichereffekt zu verzeichnen. Bei Wechselspannungsbetrieb (ohne Speichereffekt) wirkt der Fotothyristor im beleuchteten Zustand wie eine Gleichrichterdiode. Im unbeleuchteten Zustand sperrt er beide Halbwellen. Es lassen sich für diese Betriebsart relativ einfache Schaltungen ohne Gleichrichter und Siebkette nur mit einem kleinen Netztransformator aufbauen (s. Bild 10.1c). Bei einem Betrieb mit Wechselspannung erfolgt die Abschaltung des Fotothyristors nach der Unterbrechung des Lichtstrahls beim nächsten Nulldurchgang der Wechselspannung. Die Einsatzmöglichkeiten des Fotothyristors sind recht vielseitig. So lassen sich z. B. Lichtschranken mit und ohne Netztransformator, Lichtschranken mit Zeitverzögerung, Alarmgeräte und bei Verwendung von mindestens 2 Fotothyristoren Lichtstrahl-Nachlaufsteuerungen aufbauen.

10.2. Fünfschichtthyristor

Der aus der Sowjetunion stammende Fünfschichtthyristor *WKDUO*, auch „umgekehrter Thyristor" genannt, unterscheidet sich von einem normalen Thyristor mit p-n-p-n-Struktur durch die Polarität der Steuerspannung. In Bild 10.2 sind der prinzipielle Aufbau und die Strom-Spannungs-Kennlinie eines Fünfschichtthyristors dargestellt. Ist die an die Steuerelektrode G angelegte Spannung gegenüber der an der Anode A anliegenden Spannung negativer, dann ist der Übergang zwischen den beiden Schichten n_1 und p_1 leitend. Es gelangen Elektronen in das Gebiet von p_1. Ein Teil dieser Elektronen diffundiert in den Übergang, der zwischen den Schichten p_1 und n_2 liegt. Dieser Übergang ist ebenfalls in Durchlaßrichtung gepolt. Es gelangen somit die Elektronen in die Schicht

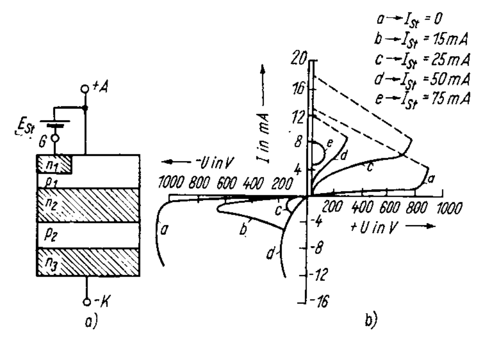


Bild 10.2 Fünfschichtthyristor; a — schematischer Aufbau eines Fünfschichtthyristors, b — Strom-Spannungs-Kennlinie

n_2. Es entsteht dadurch ein Überschuß an Elektronen, der eine zusätzliche Injektion von positiven Ladungsträgern in die Schicht n_2 zur Folge hat. Eine Stromerhöhung zwischen n_1 und p_1 bewirkt also gleichzeitig auch eine Stromerhöhung am Übergang zwischen p_1 und n_2. Der Fünfschichtthyristor wirkt in diesem Betriebszustand wie eine Kombination von zwei Vierschichtstrukturen (p-n-p-n) mit dem gemeinsamen Emitter p_1 und der Basis n_2.

Der Durchlaßstrom des Fünfschichtthyristors setzt sich aus 2 Teilströmen zusammen. Der eine Teilstrom fließt über die Schichten p_2 — n_2 — p_1, während der andere Teilstrom seinen Weg über p_2 — n_2 — p_1 — n_1 nimmt. Das tritt dann ein, wenn die Anodenspannung negativ ist und die Steuerspannung gegenüber der Anode ebenfalls negativ ist. Die Übergangszone an der Schicht n_1 — p_1 ist in diesem Fall ebenfalls leitend, während der Übergang zwischen den Schichten p_1 — n_2 nichtleitend ist. Wenn der Anodenkreis nicht geschlossen ist, stellt der Teilstrom über p_2 — n_2 — p_1 — n_1 den Steuerstrom dar. Wird der Steuerstrom vergrößert, so geht die Vierschichtstruktur in den Durchlaßzustand über. Gleichzeitig erhöht sich damit auch der Strom durch p_1 — n_2 — p_2! Der Übergang zwischen den Schichten p_2 und n_3 wirkt bei hohen Stromstärken strombegrenzend. Der hier kurz beschriebene Fünfschicht-

thyristor wurde bisher für Ströme bis zu 150 A bei Betriebsspannungen bis zu 700 V entwickelt.

10.3. Der Triac

In der Praxis ergeben sich häufig Thyristorschaltungen mit antiparallelgeschalteten Thyristoren. Durch eine Weiterentwicklung des Thyristors ist es gelungen, diese beiden antiparallelgeschalteten Thyristoren in einem einzigen Halbleiterbauelement, dem Triac, zu vereinen (Bild 10.3a). Die Vorteile dieser Entwicklung liegen in der Verkleinerung der Abmessungen und in der Verwendung nur einer Steuerelektrode. Im Gegensatz zum normalen Thyristor werden hier die Elektroden nicht mit Anode oder Katode, sondern als Hauptanschlüsse A_1 und A_2 bezeichnet (Bild 10.3).
Beim Triac sind in einer Siliziumscheibe nebeneinander 2 Thyristorsysteme (1 und 2) zwischen den Hauptanschlüssen A_1 und A_2 antiparallel mit 3 gemeinsamen Zonen (p_1, n_2, p_2) aufgebaut, die über die gemeinsame Steuerelektrode G gezündet werden können. Die metallischen Anschlüsse des Triacs liegen jeweils auf einer n- oder einer p-Schicht auf. Je nach Polung sucht sich der Strom dann den für ihn bequemsten Weg aus.

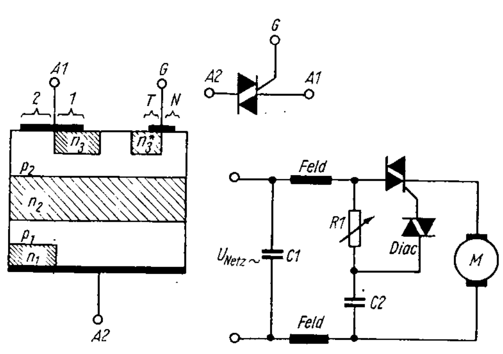


Bild 10.3 Triac; a — schematischer Aufbau und Symbol des Triacs, b — Schaltbeispiel (Drehzahlsteuerung eines Motors)

Im allgemeinen können Triacs schon mit geringen Leistungen ausgesteuert werden. Gezündet werden sie vorteilhaft mit sehr kurzen Impulsen (wenige Mikrosekunden). Allerdings muß die Amplitude des Zündimpulses eine ganz bestimmte Höhe haben. Ein 10-A-Triac, der bei einer Impulsdauer von ungefähr 100 μs gezündet werden soll, braucht einen Zündimpuls von 100 mA bei einigen Volt Zündspannung. Bei kürzerer Impulsdauer muß die Zündstromspitze entsprechend vergrößert werden (z. B. bei 3 μs Impulsdauer muß die Zündstromspitze 300 mA betragen).
Wie bereits weiter oben angedeutet, sind die Steuerschichten so angeordnet, daß bei jeder Spannungsrichtung mit positiver oder negativer Spannung, auch Torspannung genannt, gezündet werden kann. Das Tor (Steuerelektrode) besteht aus 2 Teilen, dem *Normal-Tor* N und dem *Transistor-Tor* T. Kritisch sind beim Triac besonders das du/dt- und das Freiwerdeverhalten. In der mittleren gemeinsamen Basiszone sind beim Kommutierungsvorgang immer Ladungsträger aus der Durchlaßpahse des Nachbarelements vorhanden, die zum ungewollten Zünden zur Verfügung stehen. Man versucht beide Elemente durch RC-Glieder zu entkoppeln. Auch bei den Triacs dürfen die Probleme der Kühlung nicht vernachlässigt werden. Der Kühlaufwand ist ungefähr der gleiche wie für 2 Thyristoren halber Größe. Triacs werden z. Z. für Maximalströme von 6, 10, 15, 100 und 200 A sowie für Spitzensperrspannungen von 400, 500 und 1000 V hergestellt.
Mit Triacs lassen sich kontaktlose Wechselstromschütze aufbauen. Diese sind in der vielfältigsten Weise einsetzbar (Leistungsschalter, Temperaturregelung, Drehzahlregelung von Motoren usw.). Bild 10.3b zeigt uns ein Beispiel für die Drehzahlregelung eines kleinen Universalmotors durch Phasenanschnittsteuerung. Man kann damit die Drehzahl ungefähr im Verhältnis 1:10 verändern. Das Drehmoment selbst bleibt dabei konstant.

11. Anwendungsbeispiele

Am Schluß sollen noch einige Schaltungsbeispiele zum Nachbauen anregen. Sie sind leicht aufzubauen und praktisch verwendbar.

11.1. Wechselstromsteller mit Transistoren

Die in Bild 11.1 gezeigte Schaltung eines Wechselstromstellers arbeitet nach dem Prinzip der Phasenanschnittsteuerung. Der Vorteil der Schaltung liegt in der Verwendung nur eines Thyristors. Angewendet wird dieser Wechselstromsteller bei der Drehzahlregelung kleiner Einphasen-Universalmotoren, wie wir sie z. B. bei Handbohr-, Küchen- und Nähmaschinen finden. Weiterhin kann die Schaltung zur Beleuchtungsstärkeregelung (Schmalfilmamateure!) eingesetzt werden.
Die Hauptteile der Schaltung sind der Brückengleichrichter, der Thyristor und die transistorisierte Zündschaltung. Die aus den Dioden D1 bis D4 gebildete Brückenschaltung gibt der gesamten Schaltung eine genaue festgelegte Stromrichtung,

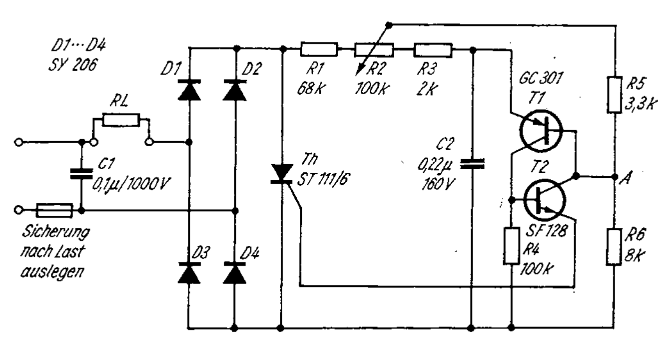


Bild 11.1 Wechselstromsteller mit Transistoren

d. h., der Thyristor kann nur in einer Richtung leitend werden. Für ein gutes Zünden des Thyristors sorgt die aus den Transistoren T1 und T2 aufgebaute Zündschaltung. Die mit R2 zu verändernde RC-Schaltung (R2, R3 und C2) ermöglicht eine Phasenverschiebung zwischen Emitter von T1 und Punkt A. Mit R2 kann der Zündzeitpunkt des Thyristors in jeder Sinushalbwelle ungefähr zwischen 25° und 170° gewählt werden.

11.2. Wechselstromsteller mit Glimmlampe

Mit der Schaltung nach Bild 11.2 läßt sich die Drehzahl der im Haushalt mit Elektromotoren betriebenen Geräte (Bohr- und Küchenmaschinen, Ventilatoren, Kleinwerkzeuge usw.) regeln. Weiterhin ist es möglich, zur Erzielung bestimmter Beleuchtungseffekte die Schaltung zur Beleuchtungsregelung zu verwenden. Der beschriebene Wechselstromsteller arbeitet mit einem Thyristor. Dieser liegt im Brückenzweig der mit den Dioden D1 bis D4 aufgebauten Gleichrichterschaltung. Der Thyristor wird recht einfach über einen Glimmlampen-Zündkreis (Gl, R1, R2 und C2) gezündet. Der Zündkreis selbst liegt an der bereits gleichgerichteten Wechselspannung (Punkt 1 und Punkt 2). C2 wird nun so lange über R1 und R2 aufgeladen, bis die Zündspannung der Glimmlampe erreicht ist. Mit dem Zünden der Glimmlampe fließt gleichzeitig ein Zündstrom über die Steuerstrecke des Thyristors, dieser wird leitend, und es fließt ein Arbeitsstrom. Es sei an dieser Stelle gleich auf einen

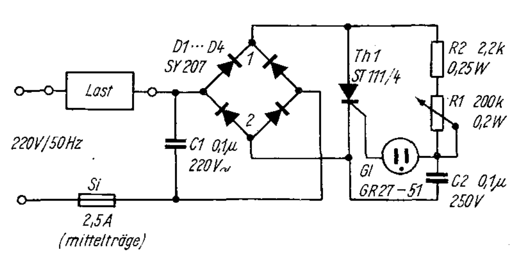


Bild 11.2 Wechselstromsteller mit Glimmlampe

kleinen Nachteil dieser Schaltung hingewiesen. Bekanntlich beträgt die Zündspannung von Glimmlampen rund 100 V. Vor Erreichen dieser Spannung wird also der Thyristor, wie oben geschildert, nie gezündet. Weiterhin tritt an den beiden Widerständen R1 und R2 ein Spannungsabfall auf, der den Einsatzpunkt der frühesten Zündung noch weiter verzögert. Der Wert des kleinsten Steuerwinkels α beträgt ungefähr 25°. Das entspricht einer Spannung von 132 V. Mit der Glimmlampensteuerung lassen sich also nur etwa 90 % der Leistung ausnutzen. Dieses Ergebnis reicht aber für die meisten Anwendungsfälle völlig aus. Wenn die gleichgerichtete Spannung den Wert 0 erreicht hat, schaltet der Thyristor ab. Durch Veränderung des Widerstandswertes von R1 wird auch der Zündzeitpunkt des Thyristors verändert (Veränderung der Ladezeit von C2!). C1 schützt die Dioden und den Thyristor vor Überspannungen aus dem Netz. Gleichzeitig wirkt er noch als Entstörkondensator. Es kann durchaus möglich sein, daß zusätzlich Entstördrosseln in der Netzzuleitung erforderlich werden. Die steile Flanke des Phasenanschnitts enthält Oberwellen, die unter Umständen bis in den Rundfunkbereich gehen und damit zu Empfangsstörungen führen. Sehr zweckmäßig ist es deshalb, diese Schaltung in ein abgeschirmtes Gehäuse einzubauen.

11.3. Sägezahngenerator

Bild 11.3 zeigt die einfache Schaltung eines Sägezahngenerators. Auch hier ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten (z. B. in Oszillografen). Im Moment des Einschaltens ist der Thyristor gesperrt und C1 nicht aufgeladen. Nach dem Einschalten wird C1 über R2 aufgeladen, und die Spannung an der Anode des Thyristors steigt an. Man stellt nun den Steuerstrom so ein, daß der Thyristor dann öffnet, wenn die Anodenspannung geringer als die Speisespannung ist. Sobald der Thyristor leitend geworden ist, entlädt sich der Kondensator über den Thyristor. Während des Entladevorgangs verringert sich die Anodenspannung beinahe bis auf den Wert 0. Der Thyristor geht wieder in den gesperrten Zustand über, da der Steuer-

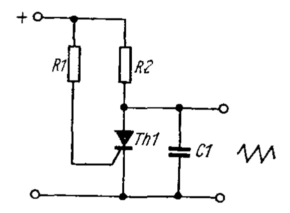


Bild 11.3 Sägezahngenerator

strom zu gering ist. Weiterhin liegt der Strom durch R2 unter dem Wert des Haltestroms — der Thyristor sperrt. Nun lädt sich C1 erneut auf, und die beschriebenen Vorgänge wiederholen sich. Der Lastwiderstand wird nach dem Ausschaltstrom des Thyristors berechnet.
Sind die Ausgangsspannung und die Impulsfolgefrequenz gegeben, so läßt sich C1 nach folgender Formel bestimmen:

$$C1 = \frac{1}{f \cdot R2 \cdot \ln\left(1 - \frac{U}{E}\right)}.$$

R1 wird nach der Formel

$$R1 = \frac{E}{I_{St}}$$

berechnet. Bei Verwendung eines Potentiometers im Steuerkreis läßt sich die Frequenz der Sägezahnspannung verändern. Man muß dabei aber eine Veränderung der Sägezahnamplitude in Kauf nehmen. Durch positive Impulse an der Steuerelektrode kann der Sägezahngenerator synchronisiert werden.

11.4. Hochstrom-Kontaktgeber für Wechselstrom

Mit der in Bild 11.4 dargestellten Schaltung ist es möglich, große Lastströme mit kleineren Schaltern (Druckknopftaster, Mikrostößeltaster u. ä.) zu schalten. Der Aufbau der Schaltung ist sehr einfach. Über eine Diode und den Schalter S wird die Steuerelektrode eines Thyristors angesteuert. Der jeweils lei-

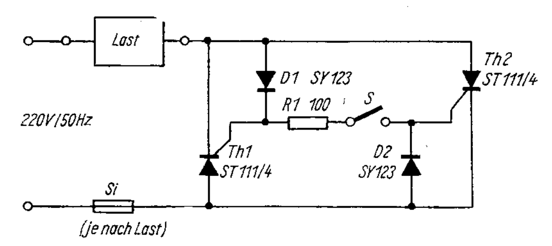


Bild 11.4 Schalten großer Lastströme mit kleinem Schalter

tende Thyristor führt den Laststrom so lange, wie auch der Schalter S geschlossen ist. Wird S geöffnet, so bleibt der Thyristor noch bis zum Nulldurchgang der Spannung im leitenden Zustand, danach sperrt er.
Da der Thyristor immer erst nach dem Öffnen des Schalters ausschaltet, können die vorher erwähnten kleinen Schalter sehr zweckmäßig zur Steuerung großer Ströme benutzt werden. Die Auswahl der Thyristoren richtet sich in jedem Fall nach dem zu schaltenden Laststrom und weiterhin nach der anliegenden Netzspannung. Auch die Auswahl der Sicherungsgröße richtet sich nach den Verhältnissen im Laststromkreis.

12. Literaturhinweise

[1] *Swoboda, R.:* Thyristoren, Telekosmos-Verlag, Stuttgart 1966

[2] *Hoffmann, A./Stocker, K.:* Thyristor-Handbuch, Siemens-Schuckertwerke AG, 1966

[3] *Eckoldt, F.:* Der Photothyristor BPY 78 und seine Anwendung. In: „Funktechnik" 1969, H. 24, S. 941—942

[4] *R. H.:* Kontaktlose Schütze. In: „Funktechnik" 1970, H. 9, S. 337—340

[5] *Jewsejew, J. A.:* Fünfschichtthyristor und symmetrischer Thyristor. In: „Elektrie" 1968, H. 5, S. 207—208

[6] *Steiger, K.-P.:* Halbleiterbauelemente der Leistungselektronik aus der UdSSR. In: „Elektrie" 1970, H. 8, S. 267—272

[7] *Tschlijanz, R.:* Sägezahngenerator mit Thyristor. In: „radio fernsehen elektronik" 1970, H. 18, S. 612

[8] *Hörniger, C.:* Wechselstromsteller mit einem Thyristor. In: „radio fernsehen elektronik" 1970, H. 19, S. 511

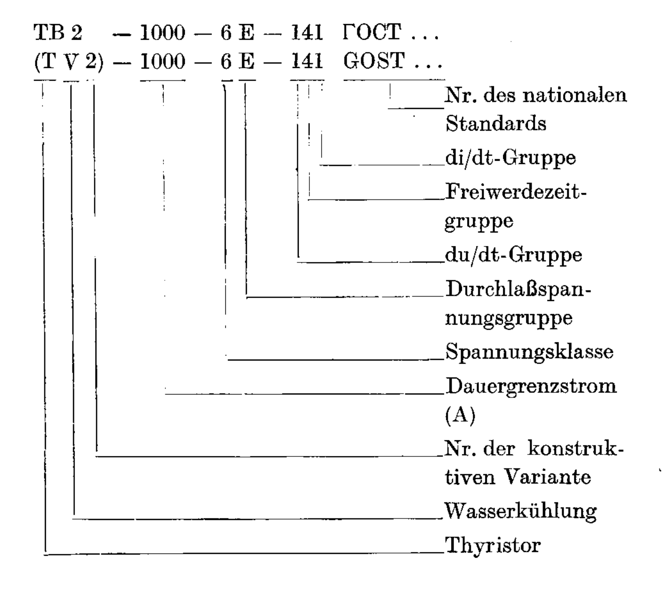
[9] Kombinat VEB Halbleiterwerk Frankfurt/Oder, Datenblätter: Si-Gleichrichterdioden u. Si-Thyristoren

[10] ČKD Prag, Datenblätter: Si-Thyristoren, Ausgabe 1967/68

13. Anhang

Im Rahmen des *RGW* wurde im Jahre 1969 eine internationale Standard-Empfehlung für Thyristoren herausgegeben. Diese Empfehlung ist nach Vorschlägen der einzelnen *RGW*-Länder im wesentlichen auf der *IEC*-Empfehlung aufgebaut worden. Die wichtigsten Festlegungen dieser *RGW*-Empfehlung sind nachstehend genannt.

13.1. Beispiel für eine Typenbezeichnung



13.2. Reihe der Dauergrenzströme

Die Angabe erfolgt vorzugsweise für eine Gehäusetemperatur von 85 °C bei Luftkühlung bzw. 55 °C bei Wasserkühlung. Sie umfaßt die Werte
10; 12,5; 16; 20; 25; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000 A.

13.3. Reihe der Spannungsklasse

Diese Reihe umfaßt die Werte
0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 16; 18; 20; 22; 24; 26.
Bei der Multiplikation der Spannungsklasse mit 100 V ergibt sich die zulässige Spitzensperr- und Blockierspannung. Die Nennspannung, definiert als empfohlener Scheitelwert sinusförmiger Anschlußspannungen, beträgt 80% der Klassenspannung.

13.4. Reihe der Durchlaßgruppen

Diese Reihe umfaßt folgende Gruppen der mittleren Durchlaßspannung bei Dauergrenzstrom:

Gruppe	A	E	K	M
ΔU in V	0,65	0,65 bis 0,75	0,75 bis 0,85	0,85 bis 1,40

13.5. Reihe der kritischen Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten (du/dt-Gruppe)

Gruppe	1	2	3	4	5	6
du/dt in V/μs	20	50	100	200	500	1000

Bauelemente ohne festgelegte du/dt-Gruppe erhalten die Gruppenbezeichnung 0 (Null).

Die Angaben gelten für die maximal zulässige Sperrschichttemperatur.

13.6. Reihe der Freiwerdezeit (Freiwerdezeit-Gruppe)

Gruppe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Freiwerdezeit in μs	250	150	100	70	50	30	20	15	12

Bauelemente ohne festgelegte Freiwerdezeit erhalten die Gruppenbezeichnung 0 (Null).
Die Angaben erfolgen für die maximal zulässige Sperrschichttemperatur.

13.7. Reihe der kritischen Stromanstiegsgeschwindigkeiten (di/dt-Gruppe)

Gruppe	1	2	3	4	5	6	7	8
di/dt in A/μs	20	50	100	200	400	600	800	1000

Bauelemente ohne festgelegte Stromanstiegsgeschwindigkeit erhalten die Gruppenbezeichnung 0 (Null).
Die Angaben erfolgen für die maximal zulässige Sperrschichttemperatur.

Tabelle 13.1. Silizium-Thyristoren des VEB Halbleiterwerk Frankfurt/Oder

		ST111/1	/2	/4	/6	/8	ST121/1	/2	/4	/6	/8
Betriebsscheitelspannung	V	70	140	280	420	560	70	140	280	420	560
Periodische und nichtperiodische Spitzenspannung	(1)V	100	200	400	600	800	100	200	400	600	800
Mittlerer Durchlaßstrom	(2)A			13					23		
mit Kühlkörper K 25/M 8	(3)A			etwa 9					etwa 12		
K 50/M 8	(3)A			etwa 13					etwa 16		
Effektiver Durchlaßstrom	A			25					40		
Periodischer Spitzendurchlaßstrom	A			90					140		
Grenzstrom	(4)A			200					300		
Durchlaßspannung bei 60 A	V			≦ 2					≦ 2		
Haltestrom bei 25 °C	mA			≦ 80					≦ 80		
Zündspannung	(5)V			≦ 3					≦ 3		
Zündstrom	(5)mA			≦ 100					≦ 100		
Nichtzündspannung	(6)V			0,3					0,3		
Kritische Spannungsanstiegsgeschwindigkeit	(7)V/μs			20					20		
Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit	(8)A/μs			20					20		
Einschaltzeit	(9)μs			Typ (3 ... 6)					Typ (3 ... 6)		
Freiwerdezeit	(10)μs			Typ (60 ... 120)					Typ (60 ... 120)		
Sperrschichttemperatur ϑj	°C			(—40 ... +100)					(—40 ... +125)		
Innerer Wärmewiderstand	grd/W			≦ 1,3					≦ 1,0		
Äußerer Wärmewiderstand bei K 25/M 8	grd/W			etwa 3,3					etwa 3,3		
K 50/M 8	grd/W			etwa 1,8					etwa 1,8		
Masse des Thyristors	g			etwa 25					etwa 25		
mit Kühlkörper K 25/M 8	g			etwa 290					etwa 290		
K 50/M 8	g			etwa 850					etwa 850		
Montagedrehmoment	kpm			0,6					0,6		

Erläuterungen zu Tabelle 13.1.

(1) Höchstzulässige Dauer der periodischen Spitzenspannung = 1 ms. Höchstzulässige Dauer der nichtperiodischen Spitzenspannung = 5 ms.
(2) Mittlerer Durchlaßstrom bei sinusförmigem Verlauf des Stromes und einer Gehäusetemperatur von 85 °C.
(3) Mittlerer Durchlaßstrom (Dauergrenzstrom) bei sinusförmigem Stromverlauf, natürlicher Luftkühlung, 45 °C Umgebungstemperatur und Kühlkörper.
(4) Grenzstrom bei 25 °C, eine Sinushalbwelle.
(5) Bei 25 °C und 12 V Blockierspannung.
(6) Bei 110 °C und dem Grenzwert der Spitzenspannung.
(7) Kritische Anstiegsgeschwindigkeit der Blockierspannung bei 110 °C und Spannungsanstieg auf den Grenzwert der Betriebsscheitelspannung.
(8) Kritische Anstiegsgeschwindigkeit des Durchlaßstroms bei 110 °C und Stromanstieg auf 50 A.
(9) Bei 25 °C und Stromanstieg auf 20 A.
(10) Bei 110 °C (ST 111); 125 °C (ST 121) und Sperrspannung mindestens 100 V.

Die angegebenen Grenzwerte sind Maximalwerte und gelten für eine Betriebsfrequenz von 40 Hz bis 60 Hz. Alle Werte gelten im gesamten Betriebstemperaturbereich.

Tabelle 13.2. ČKD-Thyristoren

		T16/1...12	T25/1 ... 12	T70/1 ... 12	T100/1 ... 12	T200/1 ... 12
Positive und negative Spitzensperrspannung	V	100 bis 1200 (in Abständen von 100 V)				
Nennstrom	A	16	25	70	100	200
Spannungsanstiegsgeschwindigkeit du/dt	V/μs	20	20	20	20	20
Durchlaßspannung	V	1,5	1,7	1,4	1,4	0,6
Stromüberlastbarkeit 10 ms	A	150	250	1120	1800	3140
Grenzlastintegral I^2t	A^2s	110	300	9000	15000	40000
Haltestrom	mA	60	60	80	80	150
Oberer Zündstrom	mA	150	150	300	300	300
Obere Zündspannung	V	3	3	3	3	3
Mittlerer Steuerverlust	W	0,5	0,5	1	1	1
Spitzensteuerverlust	W	5	5	5	5	10
Höchster Steuerstrom	A	2	2	2	2	3
Höchste positive Steuerspannung	V	10	10	10	10	10
Höchste negative Steuerspannung	V	5	5	5	5	5
Thermischer Innenwiderstand	°C/W	1,3	1	0,22	0,22	0,14
Betriebstemperaturbereich	°C		—40 bis +110			
Lagertemperaturbereich	°C		—40 bis +125			
Betriebsfrequenzbereich	Hz		50 bis 400			
Sperrstrom bei periodischer Spitzensperrspannung	mA	2	2	5	5	6

Tabelle 13.3. Sowjetische Thyristoren (Normaltypen und Lawinenthyristoren)

Typen		ВКЧ-10 (VKU-10)	T-25 (T-25)	T-50 (T-50)	T-150 (T-150)	ТЛ-100 (TL-100)	ТЛ-150 (TL-150)	ТЛ-200 (TL-200)	ТЛ-250 (TL-250)	ТЛВ-320 (TLV-320)
Nennstrom	A	10	25	50	150	100	150	200	250	320
Dauergrenzstrom bei $\vartheta c = 85$ °C	A	8	18 bis 32[2])	32 bis 62[2])	132 bis 172[2])	100	150	200	250	
Stoßstrom (10 ms)	A	150	1000	1500	3300	1500[1])	2000[1])	2500[1])	4000[1])	4400[1])
Nennspannung	V	25 bis 600	50 bis 1000	50 bis 1000	50 bis 1000	400 bis 700	5400 bis 700	400 bis 700	500 bis 800	400 bis 800
Statischer Haltestrom bei 25 °C	mA	$\leqq$ 50	$\leqq$ 400	$\leqq$ 400	$\leqq$ 500	$\leqq$ 100	$\leqq$ 100	$\leqq$ 100	220	220
Zündstrom bei 25 °C	mA	$\leqq$150	$\leqq$ 300	$\leqq$ 300	$\leqq$ 300	$\leqq$ 300	$\leqq$ 300	$\leqq$ 300	—	$\leqq$ 400
Zündspannung	V	$\leqq$ 5	$\leqq$ 5	$\leqq$ 5	$\leqq$ 7	$\leqq$ 7	$\leqq$ 7	$\leqq$ 7	—	$\leqq$ 6
maximale Freiwerdezeit bei ϑj max	µs	35	50,140 400	50,140 400	50,140 400	150	150	150	50,140 400	50,140 400
Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt	A/µs	20	10	10	10	20	20	20	20	20
Kritische Spannungsgeschwindigkeit du/dt	V/µs	50	20	20	20	100	100	100	100	100
Innerer Wärmewiderstand	grd/W	2,5	1,5	0,8	0,2	0,18	0,18	0,18	0,15	0,15
Betriebstemperatur ϑa	°C	— 40 bis +120	— 50 bis +125	— 50 bis +125	— 50 bis +125	— 50 bis +125	— 50 bis +125	— 50 bis +125	— 50 bis +140	+ 5 bis +140
Masse (ohne Kühlkörper)	g	24	120	190	450	500	500	500	850	850

[1]) Stromstoß für anschließend anliegende Spannung
[2]) In Abhängigkeit von der Durchlaßspannungsgruppe

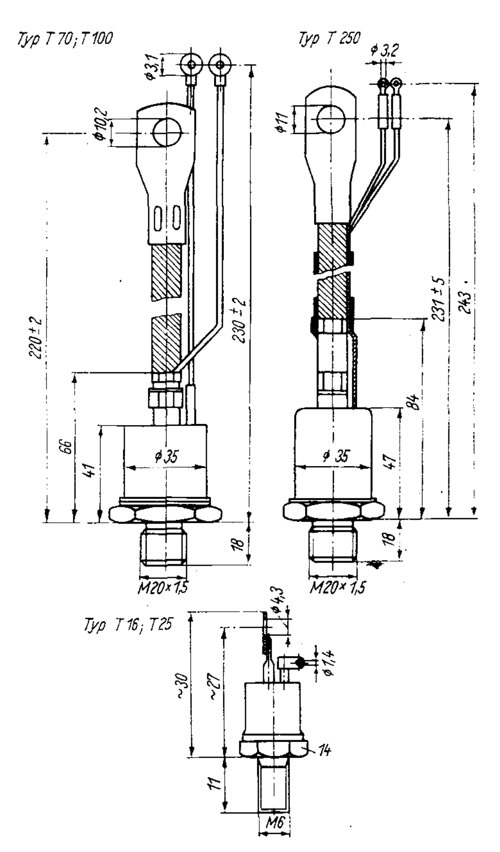
Tabelle 13.4. Sowjetische Thyristoren für höhere Frequenzen

Typen		ТЧ-10 (TC-10)	ТЧ-16 (TC-16)	ТЧ-25 (TC-25)	ТЧ-40 (TC-40)	ТЧ-50 (TC-50)	ТЧ-63 (TC-63)	ТЧ-80 (TC-80)	ТЧ-100 (TC-100)	ТЧ-125[2]) (TC-125)
Nennstrom	A	10	16	25	40	50	63	80	100	125
Dauergrenzstrom bei $\vartheta c = 85$ °C	A	10	16	25	40	50	63	80	100	125
Stoßstrom (10 ms)	A	150[1])	170[1])	200[1])	800[1])	1000[1])	1200[1])	1400[1])	1500[1])	1700[1])
Nennspannung	V				100 bis500					
Statischer Haltestrom bei 25 °C	mA	≦ 95	≦ 95	≦ 95	≦ 55	≦ 55	≦ 55	≦ 55	≦ 55	≦ 55
Zündstrom bei 25 °C	mA	800	800	800	900	900	1000	1000	1000	1000
Zündspannung	V	2	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
maximale Freiwerdezeit bei ϑj max	μs					20				
Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt	A/μs					100				
Kritische Spannungsgeschwindigkeit du/dt	V/μs					100				
Innerer Wärmewiderstand	grd/W	0,8	0,8	0,8	0,3	0,3	0,18	0,18	0,18	0,18
Betriebstemperatur ϑa	°C				—40 bis +110					
Masse (ohne Kühlkörper)	g	100	100	100	200	200	300	300	300	300

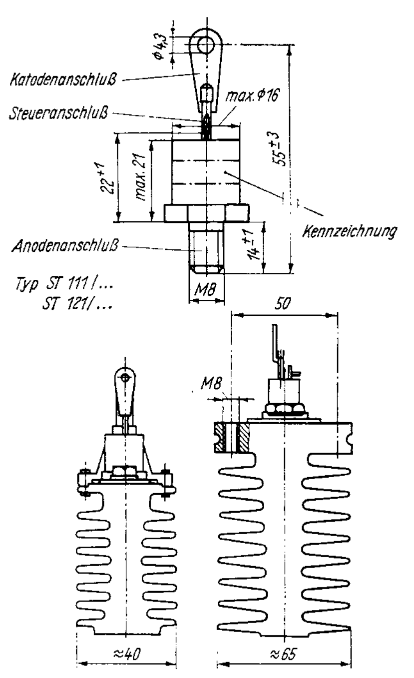
[1]) Stoßstrom für anschließend anliegende Spannung
[2]) In Entwicklung

Tabelle 13.5. Sowjetische Thyristoren (Scheibenzellen und Bauelemente für erhöhte dynamische Beanspruchung)

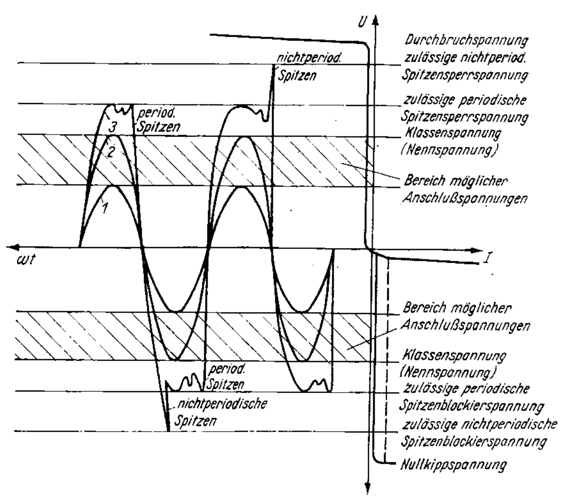
Typen		ТТ-200 (TT-200)	ТТ-250 (TT-250)	ТТ-300 (TT-300)	ТД-160 (TD-160)	ТД-200 (TD-200)	ТД-250 (TD-250)
Nennstrom	A	200	250	300	160	200	250
Dauergrenzstrom bei $\vartheta s = 85$ °C	A	200	250	300	160	200	250
Stoßstrom 10 ms für anschließend anliegende Spannung	A	4500	5000	5500	3500	4000	4400
Klassenspannung	V		100 bis 1200			100 bis 1200	
Statischer Haltestrom bei 25 °C	mA	90	90	– 90	90	90	90
Zündstrom bei 25 °C	mA	≦ 200	≦ 180	≦ 160	≦ 600	≦ 600	≦ 600
Zündspannung	V	1,7	1,5	1,4	8	8	8
maximale Freiwerdezeit bei		Gr. 0	1 2	3	Gr. 0	1 2	3
ϑj max	μs	—	250 120	85	—	250 120	85
Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt	$A/\mu s$		75 bis 30			75 bis 30	
Kritische Spannungsgeschwin-		Gr. 0	1 2	3 4	Gr. 0	1 2	3 4 5
digkeit du/dt	$V/\mu s$	—	20 50	100 200	—	20 50	100 200 500
Wärmewiderstand	grd/W	(0,20)	(0,20)	(0,20)	(0,13)	0,15	0,15
Betriebstemperatur ϑa	°C		—50 bis +125			— 50 bis +125	
Masse (ohne Kühlkörper)	g	2400(500)	2400(500)	2400(500)	4500(350)	4500(350)	4500(350)



Typ T 70; T 100
ϕ3,1
ϕ10,2
220 ± 2
230 ± 2
66
41
ϕ 35
18
M20×1,5
Typ T 250
ϕ 3,2
ϕ11
231 ± 5
243
84
47
ϕ 35
18
M20×1,5
Typ T 16; T 25
ϕ 4,3
ϕ 1,4
~30
~27
14
11
M6



Thyristor mit Kühlkörper K 25/M8 Thyristor mit Kühlkörper K 50/M8



1 = Anschlußspannung bei Sicherheitsfaktor 2,5
2 = Anschlußspannung bei Sicherheitsfaktor 1,5
3 = möglicher Spannungsverlauf am Thyristor unter Berücksichtigung periodischer und nichtperiodischer Spannungsspitzen

110